



TUGAS AKHIR - TF 141581

ANALISIS TERMODINAMIKA DAN *THERMAL STRESS* PADA GENERATOR TERMoeLEKTRIK DENGAN VARIASI GEOMETRI

AYU FITRIYAH WAHYUNI
NRP. 2413 100 063

Dosen Pembimbing :
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TF 141581

THERMODYNAMICS AND THERMAL STRESS ANALYSIS OF THERMOELECTRIC GENERATOR WITH GEOMETRY VARIATIONS

AYU FITRIYAH WAHYUNI
NRP. 2413 100 063

Supervisors :
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Ayu Fitriyah Wahyuni
NRP : 2413100063
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Termodinamika dan *Thermal Stress* Pada Generator Termoelektrik dengan Variasi Geometri” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

**Surabaya, 06 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,**



**Ayu Fitriyah Wahyuni
NRP. 2413100063**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS TERMODINAMIKA DAN *THERMAL STRESS*
PADA GENERATOR TERMOELEKTRIK DENGAN
VARIASI GEOMETRI**

Oleh:

Ayu Fitriyah Wahyuni
NRP. 2413100063

Surabaya, 06 Juli 2017

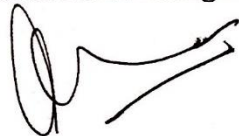
**Menyetujui,
Dosen Pembimbing I**



Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
NIPN. 19761223 200501 1 001

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing II**

u.n.



Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.
NIPN. 19880710 201504 2 001

**Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

**ANALISIS TERMODINAMIKA DAN *THERMAL STRESS*
PADA GENERATOR TERMoeLEKTRIK DENGAN
VARIASI GEOMETRI**


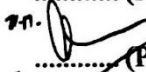



TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu
Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AYU FITRIYAH WAHYUNI
NRP. 2413100063

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.  (Pembimbing II)
3. Ir. Sarwono, M.M.  (Penguji I)
4. Ir. Roekmono, M.T.  (Penguji II)
5. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.  (Penguji III)

SURABAYA
JULI 2017

ANALISIS TERMODINAMIKA DAN *THERMAL STRESS* PADA GENERATOR TERMoeLEKTRIK DENGAN VARIASI GEOMETRI

Nama : Ayu Fitriyah Wahyuni
NRP : 2413100063
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstrak

Generator termoelektrik mengkonversi energi panas menjadi energi listrik secara langsung. Perbedaan temperatur pada pengoperasian generator termoelektrik dapat meningkatkan daya keluaran, efisiensi tetapi juga mengakibatkan tingginya *thermal stress* yang menimbulkan kegagalan material pada pin termoelektrik. Salah satu faktor yang mempengaruhi daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik adalah konfigurasi geometri generator termoelektrik. Pada tugas akhir ini, dilakukan simulasi termodinamika dan *thermal stress* untuk mengetahui efek variasi rasio luas pin, jarak antar pin, ketebalan lapisan keramik dan ketebalan lapisan tembaga terhadap daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Dari simulasi tersebut diperoleh bahwa daya keluaran dan efisiensi terbesar bernilai 30,7354 mW dan 4,4647% yang diperoleh pada variasi ketebalan lapisan keramik sebesar 0,3 mm sedangkan *thermal stress* maksimum terkecil bernilai 424,36 MPa yang diperoleh pada variasi ketebalan lapisan tembaga 0.06 mm. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan variasi geometri mempengaruhi panas yang diserap, distribusi temperatur dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik.

Kata kunci : generator termoelektrik, variasi geometri, daya keluaran, efisiensi, *thermal stress*

THERMODYNAMICS AND THERMAL STRESS ANALYSIS OF THERMOELECTRIC GENERATOR WITH GEOMETRY VARIATIONS

Name : Ayu Fitriyah Wahyuni
NRP : 2413100063
Departement : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisors : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.

Abstract

Thermoelectric generator converts thermal energy into electrical energy directly. Temperature difference of operating thermoelectric generator improve power output, efficiency and excessive thermal stress in which it causes the failure of thermoelectric pin material. One of the factors that affects the output power, efficiency and thermal stress of thermoelectric generator is geometrical configuration of generator thermoelectric. In this study, simulation of both thermodynamics and thermal stress is conducted to evaluate the effect of pin area ratio, pin distance, ceramic plate thickness and copper strip thickness on the output power, efficiency and thermal stress of thermoelectric generator. The simulation result shows that maximum output power and efficiency are 30,7354 mW and 4,4647% at 0,3 mm ceramic plate thickness but minimum thermal stress is 424,36 MPa at 0,06 mm copper strip thickness. It occurred due to the change of geometry variations affect heat absorbed, temperature distribution and thermal stress of thermoelectric generator.

Keywords : thermoelectric generator, geometry variations, output power, efficiency, thermal stress

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya serta sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Analisis Termodinamika dan *Thermal Stress* pada Generator Termoelektrik dengan Variasi Geometri**”. Tugas akhir ini membahas mengenai efek perubahan geometri terhadap daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik.

Penulis telah memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir ini, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Ngationo dan Ibu Sri Wahyuni serta adik M. Rizki Firmansyah dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, motivasi dan do'a.
2. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T. M.Si, Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika FTI ITS.
3. Bapak Ridho Hantoro S.T., M.T. dan Ibu Nur Laila Hamidah S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, motivasi dan saran dalam penyelesaian tugas akhir.
4. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan Teknik Fisika FTI ITS.
5. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku dosen wali yang telah membimbing selama perkuliahan.
6. Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dan bimbingannya selama penulis menuntut ilmu di Departemen Teknik Fisika FTI ITS.
7. Teman – teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2013.
8. Teman – teman Kelompok Studi Energi Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan Teknik Fisika FTI ITS.
9. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan ilmu bagi banyak orang.

Surabaya, 06 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN I.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN II.....	ix
Abstrak.....	xi
Abstract.....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxv
DAFTAR SIMBOL	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Efek Termoelektrik.....	5
2.2 Generator Termoelektrik	8
2.3 Analisis Termodinamika Generator Termoelektrik.....	10
2.4 Properti Termal Material	12
2.5 Properti Mekanis Material	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1 Tahapan Penelitian	17
3.2 Penentuan Ukuran dan Bahan Penyusun Bagian Generator Termoelektrik	18
3.2.1 Penentuan Ukuran Generator Termoelektrik	18
3.2.2 Penentuan Bahan Penyusun Elemen Generator Termoelektrik.....	19
3.3 Penentuan Variasi Geometri Generator Termoelektrik ..	21
3.4 Simulasi Termodinamika Generator Termoelektrik	22

3.4.1. Memasukkan Properti Bahan Penyusun, Pembuatan Geometri dan Penentuan Bahan Penyusun pada Geometri	22
3.4.2. <i>Meshing</i>	23
3.4.3. Penentuan Kondisi Batas.....	25
3.4.4. <i>Solution</i>	26
3.4.5. <i>Post Processing</i>	26
3.5 Simulasi <i>Thermal Stress</i>	27
3.6 Pengambilan Data Hasil Simulasi.....	29
3.7 Verifikasi Hasil Simulasi.....	29
3.8 Analisis Data.....	30
3.9 Penarikan Kesimpulan	30
3.10 Penyusun Laporan Akhir	30
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Verifikasi Hasil Simulasi.....	31
4.2 Analisis Termodinamika.....	32
4.2.1 Distribusi Temperatur Generator Termoelektrik Sepanjang Sumbu z	33
4.2.2 Pengaruh Rasio Luas Pin terhadap Distribusi Temperatur	35
4.2.3 Pengaruh Jarak Antar Pin terhadap Distribusi Temperatur	36
4.2.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan Keramik terhadap Distribusi Temperatur.....	37
4.2.5 Pengaruh Ketebalan Lapisan Tembaga terhadap Distribusi Temperatur.....	38
4.3 Pengaruh Geometri terhadap Performansi Generator Termoelektrik	39
4.3.1 Pengaruh Rasio Luas Pin terhadap Performansi Generator Termoelektrik	39
4.3.2 Pengaruh Jarak Antar Pin terhadap Performansi Generator Termoelektrik	41
4.3.3 Pengaruh Ketebalan Lapisan Keramik terhadap Performansi Generator Termoelektrik.....	43
4.3.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan Tembaga terhadap Performansi Generator Termoelektrik.....	44

4.3.5 Pengaruh Variasi Geometri secara Keseluruhan terhadap Performansi Generator Termoelektrik...	46
4.4 Distribusi <i>Thermal Stress</i> pada Generator Termoelektrik	47
4.4.1 Pengaruh Rasio Luas Pin terhadap <i>Thermal Stress</i> Generator Termoelektrik	51
4.4.2 Pengaruh Jarak antar Pin terhadap <i>Thermal Stress</i> pada Generator Termoelektrik	52
4.4.3 Pengaruh Ketebalan Lapisan Keramik terhadap <i>Thermal Stress</i> pada Generator Termoelektrik ..	53
4.4.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan Tembaga Terhadap <i>Thermal Stress</i> pada Generator Termoelektrik	55
4.4.5 Pengaruh Variasi Geometri terhadap <i>Thermal Stress</i> Generator Termoelektrik	56
BAB V PENUTUP.....	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	61
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rangkaian listrik efek Seebeck (Paul, 2014).....5
Gambar 2.2	Rangkaian listrik efek Peltier (Paul, 2014).....6
Gambar 2.3	Mekanisme konduksi (Paul, 2014)7
Gambar 2.4	Rangkaian modul generator termoelektrik (Karri,2011)9
Gambar 2.5	Aliran panas daerah panas menuju daerah dingin (Callister & Wiley, 2007) 13
Gambar 2.6	Kurva jarak antar atom terhadap energi potensial (Callister & Wiley, 2007) 14
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian 17
Gambar 3.2	Koefisien Seebeck pin termoelektrik (Erturun & Mossi, 2012)21
Gambar 3.3	Koefisien pemuaian panas material (Erturun & Mossi, 2012)21
Gambar 3.4	Geometri awal generator termoelektrik22
Gambar 3.5	Hasil <i>meshing</i> pada simulasi termodinamika.....25
Gambar 3.6	Letak kondisi batas simulasi termodinamika.....26
Gambar 3.7	Kontur temperatur generator termoelektrik27
Gambar 3.8	Hasil <i>meshing</i> pada simulasi <i>thermal stress</i>27
Gambar 3.9	Letak kondisi batas simulasi <i>thermal stress</i>28
Gambar 3.10	Kontur <i>thermal stress</i> generator termoelektrik..29
Gambar 4.1	Kontur distribusi temperatur hasil simulasi pada (a) penelitian ini (b) penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012)31
Gambar 4.2	Kontur <i>thermal stress</i> total hasil simulasi pada (a) penelitian ini (b) penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012)32
Gambar 4.3	Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2 .33
Gambar 4.4	Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi jarak antar pin (a) 0,25 (b) 0,5 (c) 0,75 (d) 1 mm33

Gambar 4.5	Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi ketebalan keramik (a) 0,3 (b) 0,8 (c) 1,3 (d) 1,8 mm	34
Gambar 4.6	Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi ketebalan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm.....	34
Gambar 4.7	Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2	36
Gambar 4.8	Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi jarak antar pin (a) 0,25 (b) 0,5 (c) 0,75 (d) 1 mm	37
Gambar 4.9	Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi ketebalan lapisan keramik (a) 0,3 (b) 0,8 (c) 1,3 (d) 1,8 mm	38
Gambar 4.10	Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi ketebalan lapisan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm	38
Gambar 4.11	Grafik pengaruh rasio pin terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik.....	40
Gambar 4.12	Grafik pengaruh jarak antar pin terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik .	42
Gambar 4.13	Grafik pengaruh ketebalan lapisan keramik terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik.....	44
Gambar 4.14	Grafik pengaruh ketebalan lapisan tembaga terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik.....	45
Gambar 4.15	Grafik pengaruh variasi geometri terhadap daya keluaran generator termoelektrik	46
Gambar 4.16	Grafik pengaruh variasi geometri terhadap efisiensi generator termoelektrik.....	47
Gambar 4.17	Distribusi <i>thermal stress</i> dengan variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2	48
Gambar 4.18	Distribusi <i>thermal stress</i> pada variasi jarak antar pin (a) 0,25 (b) 0,5 (c) 0,75 (d) 1 mm	49

Gambar 4.19	Distribusi <i>thermal stress</i> pada variasi ketebalan lapisan keramik (a) 0,3 (b) 0,8 (c) 1,3 (d) 1,8 mm.....	49
Gambar 4.20	Distribusi <i>thermal stress</i> pada variasi ketebalan lapisan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm.....	50
Gambar 4.21	Distribusi <i>thermal stress</i> dengan variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2 pada lapisan tembaga sisi panas.....	51
Gambar 4.22	Grafik pengaruh rasio luas pin terhadap <i>thermal stress</i> generator termoelektrik.....	52
Gambar 4.23	Distribusi <i>thermal stress</i> dengan variasi jarak antar pin (a) 0,25 (b) 0,5 (c) 0,75 (d) 1 mm pada lapisan tembaga sisi panas.....	52
Gambar 4.24	Grafik pengaruh jarak antar pin terhadap <i>thermal stress</i> generator termoelektrik.....	53
Gambar 4.25	Distribusi <i>thermal stress</i> dengan variasi ketebalan lapisan keramik (a) 0,3 (b) 0,8 (c) 1,3 (d) 1,8 mm pada lapisan tembaga sisi panas	54
Gambar 4.26	Grafik pengaruh ketebalan lapisan keramik terhadap <i>thermal stress</i> generator termoelektrik.....	54
Gambar 4.27	Distribusi <i>thermal stress</i> dengan variasi ketebalan lapisan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm pada lapisan tembaga sisi panas	55
Gambar 4.28	Grafik pengaruh ketebalan lapisan tembaga terhadap <i>thermal stress</i> generator termoelektrik.....	56
Gambar 4.29	Grafik pengaruh variasi geometri terhadap <i>thermal stress</i> maksimum generator termoelektrik	57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Ukuran generator termoelektrik (Erturun & Mossi, 2012).....	19
Tabel 3.2	Elemen penyusun generator termoelektrik dan bahan pembuatnya (Erturun & Mossi, 2012)	19
Tabel 3.3	Properti material Bi_2Te_3 dan Cu (Erturun & Mossi, 2012)	19
Tabel 3.4	Properti material Al_2O_3 dan Sn-Pb (Erturun & Mossi, 2012)	20
Tabel 3.5	Variasi geometri generator termoelektrik	22
Tabel 3.6	Detail ukuran luas pin pada variasi rasio luas pin	23
Tabel 3.7	Jumlah elemen <i>meshing</i> simulasi termodinamika	24
Tabel 3.8	Kondisi batas simulasi termodinamika (Erturun & Mossi, 2012)	25
Tabel 3.9	Jumlah elemen <i>meshing</i> simulasi termodinamika	28
Tabel 4.1	Perbandingan nilai variabel keluaran hasil simulasi pada penelitian ini dengan penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012).....	32
Tabel 4.2	Hasil simulasi termodinamika dengan variasi rasio luas pin.....	40
Tabel 4.3	Hasil simulasi termodinamika dengan variasi jarak antar pin	41
Tabel 4.4	Hasil simulasi termodinamika dengan variasi ketebalan lapisan keramik.....	43
Tabel 4.5	Hasil simulasi termodinamika dengan variasi ketebalan lapisan tembaga	45

DAFTAR SIMBOL

A	Luas Bidang (m^2)
I	Arus Listrik (A)
K	Konduktansi Termal (watt/K)
k	Konduktivitas Termal (watt/mK)
L	Ketebalan (m)
P_o	Daya Keluaran (watt)
\dot{Q}_{cond}	Laju Perpindahan Panas secara Konduksi (watt)
Q_h	Panas yang Diserap (watt)
\dot{Q}_{pn}	Laju Perpindahan Panas karena Efek Peltier (watt)
\dot{Q}_s	Laju Perpindahan Panas karena Efek Thomson (watt)
\dot{Q}_J	Panas Joule (watt)
R	Resistansi Listrik (Ω)
R_o	Resistansi Listrik Internal (Ω)
T_c	Temperatur Sisi Dingin (K)
T_h	Temperatur Sisi Panas (K)
ΔV	Beda Potensial (volt)
ZT	Figure of Merit
α	Koefisien Seebeck (volt/K)
η	Efisiensi Termal
π_p	Laju Koefisien Peltier Pin Tipe-p (watt/A)
π_n	Koefisien Peltier Pin Tipe-n (watt/A)
ρ	Resistivitas Listrik ($\Omega.m$)
σ	Konduktivitas Listrik ($\Omega.m$) ⁻¹
τ'	Koefisien Thomson (volt/K)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konversi energi merupakan proses perubahan bentuk energi yang satu ke bentuk energi lainnya. Terdapat dua metode dalam konversi energi yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Pembangkit listrik tenaga uap merupakan contoh penerapan metode konversi energi tidak langsung dimana bahan bakar fosil digunakan untuk menghasilkan uap yang memiliki energi panas. Uap tersebut digunakan untuk memutar turbin sehingga dihasilkan energi kinetik yang selanjutnya digunakan untuk memutar generator. Generator berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Turbin diperlukan sebagai alat tambahan untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik sebelum dikonversi menjadi energi listrik pada metode konversi energi tidak langsung sedangkan pada metode konversi energi langsung, energi panas dapat dikonversi menjadi energi listrik secara langsung.

Proses konversi energi menghasilkan energi yang terbuang berupa panas dimana jumlahnya bertambah secara signifikan karena keterbatasan teknologi yang digunakan. Pembangkit listrik melepas 50-60% energi panas masukan (White, 1991) sedangkan pada proses pembakaran di dalam kendaraan, lebih dari 50% energi bahan bakar terbuang berupa panas ke lingkungan melalui sistem pembuangan gas dan pendinginan (Zheng, Yan, & Simpson, 2013). Panas yang terbuang dari sebuah sistem dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui metode konversi energi secara langsung akan meningkatkan efisiensi sistem dan membantu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (Erturun & Mossi, 2015). Teknologi yang dapat digunakan untuk mengkonversi panas buangan menjadi energi listrik secara langsung adalah generator termoelektrik.

Generator termoelektrik bekerja berdasarkan efek Seebeck yaitu pada rangkaian tertutup ketika dua bahan logam yang berbeda dihubungkan dan dioperasikan dengan perbedaan temperatur maka arus listrik akan mengalir di dalam rangkaian. Generator

termoelektrik tersusun atas pasangan material termoelektrik tipe-p dan tipe-n yang dihubungkan oleh konduktor listrik serta lapisan keramik. Material yang sering digunakan untuk membuat pin generator termoelektrik pada saat ini adalah *Bismuth Telluride* (Bi_3Te_2) (Hsu, Huang, Chu, Yu, & Yao, 2011). Adanya perbedaan temperatur yang tinggi antara sisi panas dan dingin akan meningkatkan daya keluaran dan efisiensi akan tetapi juga mengakibatkan tingginya *thermal stress* yang menimbulkan kegagalan material pada pin termoelektrik sehingga berdampak negatif pada kinerja dan *lifecycle* generator termoelektrik.

Berdasarkan penelitian Ugur Erturun, diketahui bahwa perubahan bentuk pin termoelektrik mempengaruhi daya keluaran, efisiensi dan dapat mengurangi *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik (Erturun & Mossi, 2012). Penelitian A.S. Al-Merbati menunjukkan bahwa perubahan rasio luasan pin termoelektrik sisi panas dan sisi dingin dapat mengurangi *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik (Al-Merbati, Yilbas, & Sahin, 2013). Selanjutnya Yongjia Wu melakukan penelitian mengenai efek pengurangan ketebalan lapisan tembaga, penambahan ketebalan lapisan keramik dan lapisan solder timah, serta pengurangan jarak antar pin termoelektrik yang dapat mengurangi *thermal stress* pada generator termoelektrik (Wu et al., 2014). Pada penelitian tersebut tidak dilakukan analisis termodinamika untuk mengetahui daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan akibat perubahan variasi geometri yang dilakukan.

Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini akan dilakukan analisis termodinamika dan *thermal stress* pada generator termoelektrik dengan variasi geometri menggunakan *software thermal electric* dan *static structural* sehingga diperoleh geometri yang optimum untuk meningkatkan daya keluaran dan efisiensi serta memperkecil *thermal stress* pada generator termoelektrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana efek rasio luas pin dan jarak antar pin terhadap besarnya daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* pada generator termoelektrik?
- b. Bagaimana efek ketebalan lapisan keramik dan ketebalan lapisan tembaga terhadap besarnya daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* pada generator termoelektrik?

1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui efek rasio luas pin dan jarak antar pin terhadap besarnya daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* pada generator termoelektrik.
- b. Mengetahui efek ketebalan lapisan keramik dan ketebalan lapisan tembaga terhadap besarnya daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* pada generator termoelektrik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Variabel termodinamika yang dianalisis pada penelitian ini adalah temperatur.
- b. Ukuran, material penyusun generator termoelektrik dan kondisi batas yang digunakan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ugur Erturun (2012).
- c. Simulasi untuk mengetahui distribusi temperatur, arus yang digenerasikan, panas yang diserap dan *thermal stress* dilakukan dengan menggunakan *software thermal electric* dan *static structural*.
- d. Pemanasan yang terjadi diasumsikan dalam keadaan *steady* dan seluruh permukaan generator termoelektrik terisolasi dengan baik.

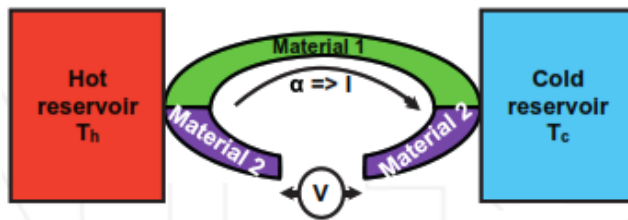
“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Efek Termoelektrik

Efek termoelektrik pada suatu benda padat telah diketahui sejak tahun 1821 (Angrist, 1976). Efek termoelektrik tersebut adalah sebagai berikut:

a. Efek Seebeck



Gambar 2.1 Rangkaian listrik efek Seebeck (Paul, 2014)

Ketika dua logam yang terbuat dari material berbeda dihubungkan oleh dua sisi yang memiliki perbedaan temperatur maka akan terjadi perbedaan tegangan potensial antara dua logam tersebut yang disebut dengan tegangan Seebeck. Rangkaian listrik untuk menggambarkan efek Seebeck dapat dilihat pada Gambar 2.1. Tegangan Seebeck tersebut dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.1).

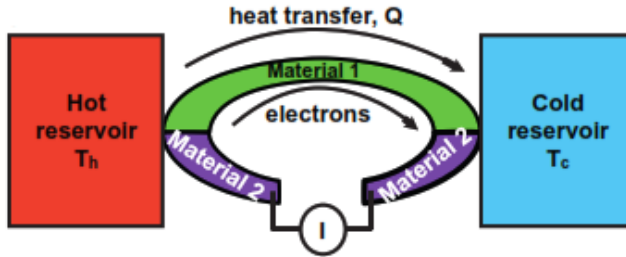
$$\Delta V = \int_{T_c}^{T_h} \alpha \, dT \quad (2.1)$$

b. Efek Peltier

Ketika dua logam yang terhubung antara sisi panas dan sisi dingin mengalirkan arus listrik maka panas akan diserap dari satu sisi untuk diberikan ke sisi lainnya seperti pada Gambar 2.2 (Soo, 1968). Nilai panas yang diserap sebanding dengan arus listrik yang mengalir. Panas yang dipindahkan tiap satuan waktu ditulis secara matematis pada Persamaan (2.2). Koefisien Peltier merupakan

energi panas yang dibawa oleh setiap elektron per unit muatan dan waktu dari sisi panas ke sisi dingin.

$$\dot{Q}_{pn} = (\pi_p - \pi_n)I \quad (2.2)$$



Gambar 2.2 Rangkaian listrik efek Peltier (Paul, 2014)

c. Efek Thomson

Ketika arus listrik mengalir sepanjang logam yang homogen dimana terjadi perbedaan temperatur di dalamnya maka akan terjadi efek pemanasan yang disebut dengan efek Thomson. Panas tersebut bernilai lebih besar atau kurang dari nilai pemanasan Joule tergantung pada besar dan arah arus listrik, temperatur dan material yang digunakan (Angrist, 1976). Perpindahan panas yang terjadi akibat efek Thomson ditulis secara matematis pada Persamaan (2.3).

$$\dot{Q}_s = I^2 R - I\tau' \Delta T \quad (2.3)$$

dimana

$$\tau' = -T \frac{d\alpha}{dT} \quad (2.4)$$

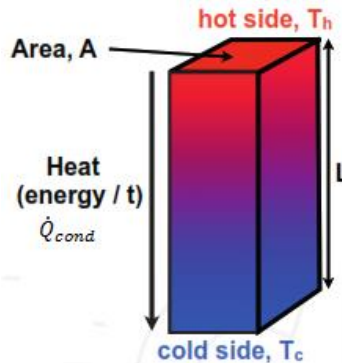
d. Efek Fourier

Perpindahan panas secara konduksi sepanjang elemen generator termoelektrik juga dikenal sebagai efek Fourier karena fenomena tersebut direpresentasikan oleh Hukum Fourier tentang

perpindahan panas secara konduksi satu dimensi. Hukum tersebut ditulis secara matematis pada Persamaan (2.5).

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{kA \Delta T}{L} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

Konduksi merupakan perpindahan energi dari suatu partikel ke partikel lainnya dalam suatu material akibat adanya interaksi antar partikel. Berdasarkan Persamaan (2.5), nilai perpindahan panas konduksi sebanding dengan luas permukaan material, konduktivitas termal material dan gradien temperatur yang merupakan kemiringan kurva temperatur pada diagram T-x pada posisi x. Gradien temperatur bernilai negatif ketika temperatur mengalami penurunan dengan adanya penambahan panjang (Cengel YA, 2006). Mekanisme konduksi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Mekanisme konduksi (Paul, 2014)

e. Efek Joule

Arus listrik yang mengalir sepanjang beban menghasilkan panas (Paul, 2014). Panas yang digenerasikan tersebut terjadi karena adanya efek Joule sehingga disebut dengan panas Joule. Panas Joule ditulis secara matematis pada Persamaan (2.6) (Soo, 1968).

$$\dot{Q}_J = I^2 R \quad (2.6)$$

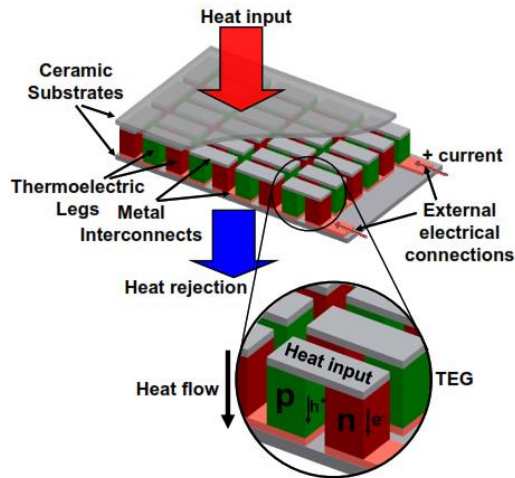
2.2 Generator Termoelektrik

Generator termoelektrik merupakan teknologi yang dapat digunakan untuk mengubah energi panas menjadi energi listrik secara langsung berdasarkan efek Seebeck (Zhang et al., 2016). Efek Seebeck menjelaskan bahwa ketika dua logam tipe-p dan tipe-n yang terbuat dari material berbeda dihubungkan oleh dua sisi yang memiliki perbedaan temperatur maka akan terjadi perbedaan tegangan potensial antara dua logam tersebut. Generator termoelektrik terdiri dari beberapa pasang pin termoelektrik tipe-p dan tipe-n. Pada saat sekarang, pin tipe-p terbuat dari bahan semikonduktor yang didoping sehingga muatan yang dibawa berupa *hole* sedangkan pin tipe-n terbuat dari bahan semikonduktor yang didoping sehingga muatan yang dibawa berupa elektron. Sumber panas yang diberikan pada generator termoelektrik akan mendorong elektron pada pin tipe-n menuju sisi dingin sehingga menciptakan arus melalui rangkaian. *Hole* pada tipe-p akan mengalir searah dengan arus yang terbentuk.

Untuk aplikasi generator termoelektrik maka pasangan pin termoelektrik dirangkai bersama pada suatu modul termoelektrik. Parameter yang mempengaruhi daya keluaran generator termoelektrik adalah *figure of merit*, rasio temperatur pengoperasian dan beban eksternal (Ali & Yilbas, 2016). *Figure of merit* merupakan bentuk penyederhanaan dari tiga parameter material penyusun generator termoelektrik yaitu koefisien Seebeck (α), konduktivitas listrik (σ) dan konduktivitas termal (λ). Penulisan matematis dari *figure of merit* dapat dilihat pada Persamaan (2.7).

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} T \quad (2.7)$$

Semakin tinggi nilai *figure of merit* maka performansi generator termoelektrik semakin baik (Angrist, 1976).



Gambar 2.4 Rangkaian modul generator termoelektrik (Karri, 2011)

Pin termoelektrik terhubung secara seri dari segi listrik dan terhubung secara paralel dari segi panas. Rangkaian modul generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 2.4. Berdasarkan Gambar 2.4, generator termoelektrik tersusun atas beberapa elemen, berikut ini adalah elemen penyusun generator termoelektrik beserta fungsinya:

a. Lapisan Keramik

Lapisan keramik digunakan sebagai insulator listrik pada generator termoelektrik. Keramik yang digunakan harus memiliki konduktansi termal yang baik sehingga perpindahan panas terjadi dengan resistansi panas minimum. Bahan keramik yang biasa digunakan pada generator termoelektrik adalah aluminium oksida (Al_2O_3).

b. Lapisan Konduktor

Lapisan konduktor berfungsi sebagai lapisan penghantar listrik yang menghubungkan pin termoelektrik tipe-p dan tipe-n. Material konduktor yang biasa digunakan pada generator

termoelektrik adalah tembaga karena memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi (Erturun, Erermis, & Mossi, 2014). Tembaga juga berfungsi untuk meminimalisir resistansi listrik dan termal antara sumber panas dan pin termoelektrik (Yamashita, Odahara, & Tomiyoshi, 2004).

- c. Lapisan Solder
Lapisan solder merupakan lapisan penghubung antara lapisan tembaga dan pin termoelektrik.
- d. Pin Termoelektrik
Pin termoelektrik merupakan elemen termoelektrik yang terdiri dari tipe-p dan tipe-n dimana fungsinya untuk membawa muatan dari sisi panas ke sisi dingin sehingga timbul beda potensial pada kedua sisi karena adanya perbedaan temperatur. Material penyusun termoelektrik yang baik terbuat dari semikonduktor dengan koefisien Seebeck pada range 150 – 250 $\mu\text{V/K}$ (Sharp, 2016) seperti *bismuth-telluride*, *lead-telluride*, *antimony telluride* dan *silicon-germanium*. Semikonduktor dipilih sebagai material penyusun pin termoelektrik karena memiliki *figure of merit* lebih tinggi jika dibandingkan dengan logam (Angrist, 1976). Pemilihan material yang digunakan didasarkan pada *range* temperatur pengoperasian generator termoelektrik yang berbeda sesuai dengan penggunaannya.

2.3 Analisis Termodinamika Generator Termoelektrik

Analisis termodinamika dilakukan untuk mengetahui distribusi temperatur dan perpindahan panas yang terjadi pada generator termoelektrik sehingga dapat dihitung daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Asumsi yang digunakan untuk menganalisis fenomena yang terjadi pada generator termoelektrik adalah sebagai berikut (Angrist, 1976):

- a. Generator termoelektrik bekerja diantara dua temperatur yaitu T_H dan T_C , dimana T_H adalah temperatur sumber panas yang digenerasikan dan T_C adalah temperatur pada reservoir.
- b. Resistansi listrik penghubung *junction* diabaikan.

- c. Lengan generator termoelektrik memiliki luasan yang konstan.
- d. Resistivitas listrik, konduktivitas termal dan koefisien Seebeck dari material dipengaruhi oleh temperatur.
- e. Resistansi kontak panas antara sumber dan material penghubung elemen termoelektrik tipe-p dan tipe-n akan bernilai kecil jika menggunakan material isolasi yang baik.

Panas yang diserap pada sisi panas generator termoelektrik (Q_h) secara matematis dapat ditulis seperti pada Persamaan (2.8).

$$Q_h = \alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R + K \Delta T \quad (2.8)$$

dimana koefisien Seebeck dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.9).

$$\alpha = |\alpha_n| + |\alpha_p| \quad (2.9)$$

Resistansi elektrik internal generator termoelektrik (R) dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.10).

$$R_o = \rho_n \left(\frac{L_n}{A_n} \right) + \rho_p \left(\frac{L_p}{A_p} \right) \quad (2.10)$$

Konduktansi panas internal generator termoelektrik dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.11).

$$K = \lambda_n \left(\frac{A_n}{L_n} \right) + \lambda_p \left(\frac{A_p}{L_p} \right) \quad (2.11)$$

Generator termoelektrik bekerja karena adanya perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin sesuai dengan Persamaan (2.12).

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.12)$$

Tegangan listrik Seebeck yang dihasilkan oleh generator termoelektrik secara matematis dapat dituliskan pada Persamaan (2.13).

$$\Delta V = \int_{T_c}^{T_h} \alpha \, dT \quad (2.13)$$

Arus listrik yang mengalir sepanjang generator termoelektrik secara matematis dapat dituliskan pada Persamaan (2.14).

$$I = \frac{\Delta V}{(R + R_o)} \quad (2.14)$$

Daya keluaran yang dihasilkan generator termoelektrik secara matematis dapat dilihat pada Persamaan (2.15).

$$P_o = I \cdot \Delta V \quad (2.15)$$

Sehingga efisiensi dari generator termoelektrik secara matematis dapat dituliskan pada Persamaan (2.16).

$$\eta = \frac{P_o}{Q_h} \quad (2.16)$$

2.4 Properti Termal Material

Properti termal dari suatu bahan menunjukkan respon dari bahan ketika dikenai panas (Callister & Wiley, 2007). Misalnya pada zat padat, zat padat menyerap energi berupa panas, maka temperatur dan ukuran zat akan mengalami perubahan. Energi tersebut akan dialirkan ke daerah yang lebih dingin pada zat jika terjadi gradien temperatur dan pada akhirnya zat tersebut akan meleleh. Konduktivitas termal, koefisien pemuaian panas dan *thermal stress* merupakan properti yang sering digunakan pada pemanfaatan zat padat.

a. Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal menunjukkan kemampuan suatu bahan untuk mengalirkan panas. Persamaan matematis untuk konduktivitas termal dapat dilihat pada Persamaan (2.17).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) berlaku untuk aliran panas yang *steady* dimana fluks panas tidak berubah terhadap waktu. Aliran panas dari suatu daerah panas dengan temperatur T_2 menuju daerah dingin dengan temperatur T_1 dengan $T_2 > T_1$ adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5 Aliran panas daerah panas menuju daerah dingin (Callister & Wiley, 2007)

Panas mengalir dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah. Peristiwa tersebut disebabkan oleh adanya getaran atom dan elektron bebas yang membawa energi dari daerah panas ke daerah dingin.

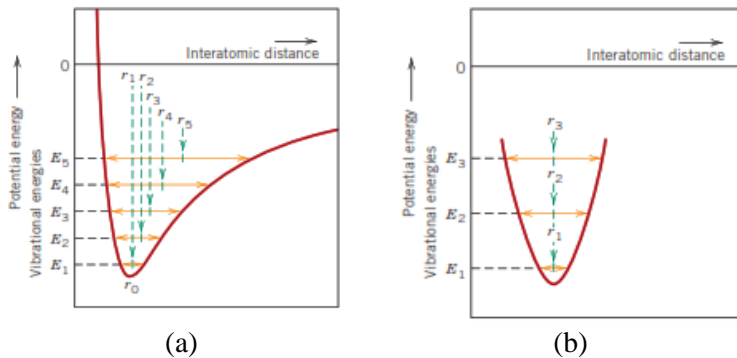
b. Pemuaian Panas

Zat padat akan memuai jika dipanaskan dan akan menyusut ketika didinginkan. Perubahan panjang disertai dengan perubahan temperatur pada zat padat akibat pemuaian dapat ditulis secara matematis seperti pada Persamaan (2.18).

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l(T_f - T_0) \quad (2.18)$$

Pemuaian panas terjadi karena adanya kenaikan jarak rata – rata antar atom. Fenomena tersebut dapat dipahami melalui kurva

antara jarak antar atom pada kondisi setimbang pada temperatur 0 K terhadap energi potensial untuk zat padat. Pada Gambar 2.6a, proses pemanasan dapat menyebabkan kenaikan temperatur T_1 ke T_2 hingga T_3 dan seterusnya sehingga energi getaran mengalami kenaikan dari E_1 ke E_2 hingga E_3 dan seterusnya. Besarnya energi getaran atom berhubungan dengan lebar kurva pada masing – masing temperatur dan jarak antar atom rata – rata akan mengalami kenaikan dari r_1 ke r_2 hingga r_3 dan seterusnya akibat adanya kenaikan temperatur.



Gambar 2.6 Kurva jarak antar atom terhadap energi potensial (Callister & Wiley, 2007)

Pemuaian panas pada suatu zat sesungguhnya ditunjukkan oleh kurva asimetris antara jarak antar atom terhadap energi potensial dimana kenaikan temperatur akan menyebabkan kenaikan getaran atom. Jika kurva tersebut berbentuk simetris seperti pada Gambar 2.6b maka tidak ada perubahan jarak antar atom sehingga tidak akan terjadi pemuaian panas.

c. *Thermal Stress*

Thermal stress merupakan *stress* yang disebabkan oleh faktor berikut ini:

- Pemuaian panas yang ditahan
- Gradien temperatur

Analisis *thermal stress* pada suatu bahan penting dilakukan karena *thermal stress* dapat menyebabkan keretakan atau deformasi plastis yang tidak diharapkan (Callister & Wiley, 2007).

- *Thermal Stress* karena Pemuaian yang Ditahan

Batang padat yang homogen dan bersifat isotropis dipanaskan secara *uniform* sehingga tidak menimbulkan gradien temperatur. Pemanasan tersebut akan menimbulkan *thermal stress* pada batang tembaga. Persamaan matematis *thermal stress* yang dihasilkan karena adanya perbedaan temperatur dapat dilihat pada Persamaan (2.19).

$$\sigma = E\alpha_l(T_0 - T_f) = E\alpha_l\Delta T \quad (2.19)$$

- *Thermal Stress* karena Gradien Temperatur

Ketika zat padat dipanaskan atau didinginkan maka distribusi temperatur internal zat akan dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk, konduktivitas bahan, dan perubahan temperatur yang terjadi. Adanya gradien temperatur pada zat padat tersebut dapat menimbulkan *thermal stress*.

2.5 Properti Mekanis Material

a. Modulus Elastisitas

Hubungan antar *engineering stress* dan *engineering strain* dapat dijelaskan melalui Hukum Hooke. Persamaan matematis Hukum Hooke dapat dilihat pada Persamaan (2.20).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.20)$$

b. Rasio Poisson

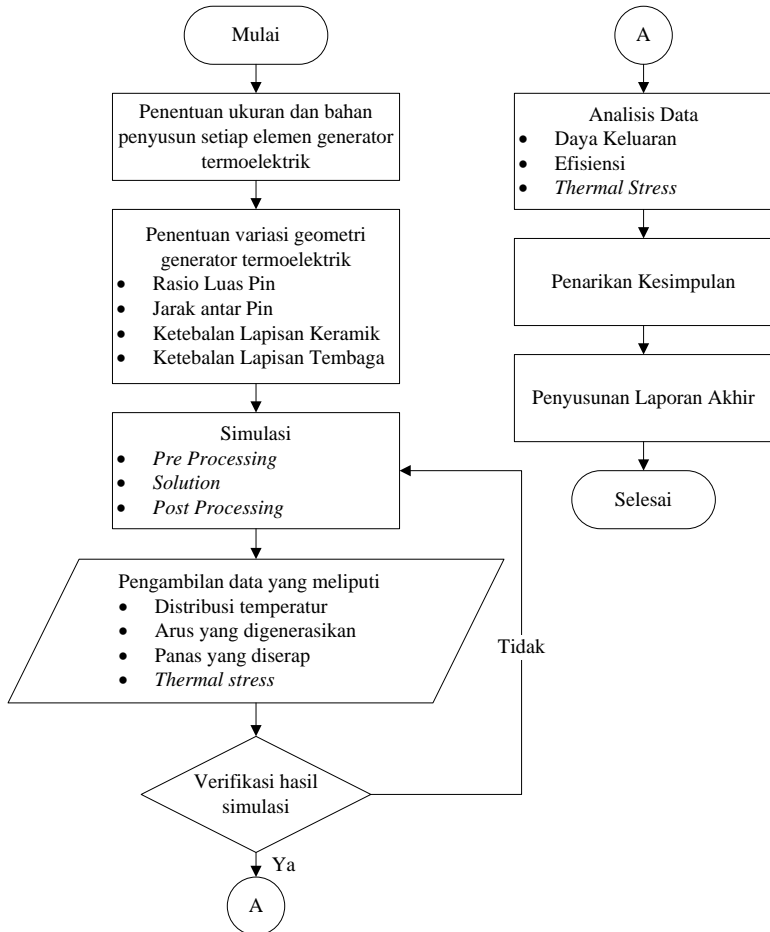
Rasio Poisson merupakan perbandingan antara *lateral strain* dan *axial strain*. Untuk logam atau campuran lainnya, nilai rasio Poisson pada range 0,25 hingga 0,35. Persamaan matematis dari rasio Poisson dapat dilihat pada Persamaan (2.21).

$$v = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (2.21)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Tahap awal penelitian ini adalah penentuan ukuran dan bahan penyusun dari setiap elemen generator termoelektrik berdasarkan penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012), selanjutnya adalah penentuan variasi geometri yang digunakan pada penelitian ini yaitu rasio luas pin, jarak antar pin, ketebalan lapisan keramik dan ketebalan lapisan tembaga. Pada tugas akhir ini dilakukan simulasi termodinamika menggunakan *software thermal electric* dan simulasi *thermal stress* menggunakan *software static structural*. Simulasi tersebut terdiri dari tiga tahap yaitu *pre processing*, *solution* dan *post processing*. *Pre processing* terdiri dari beberapa tahap yaitu memasukkan properti bahan penyusun pada *engineering data*, pembuatan geometri, *meshing* dan penentuan kondisi batas yang digunakan. *Solution* merupakan tahap perhitungan atau iterasi oleh komputer terhadap kondisi batas yang telah ditentukan. *Post processing* merupakan tahap pengambilan hasil simulasi berupa kontur atau grafik, pada tahap ini penulis akan mengambil hasil simulasi berupa kontur distribusi temperatur, arus yang digenerasikan, panas yang diserap dan kontur distribusi *thermal stress* pada generator termoelektrik.

Data yang diperoleh dari hasil simulasi akan dibandingkan dengan hasil simulasi pada penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012) melalui tahap verifikasi. Jika selisih yang dihasilkan pada tahap verifikasi dibawah 10% maka akan dilakukan analisis data meliputi perhitungan daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Hasil simulasi akan dibahas setelah dilakukan analisis data sehingga dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini. Tahap akhir dari pengerjaan penelitian ini adalah penyusunan laporan akhir penelitian.

3.2 Penentuan Ukuran dan Bahan Penyusun Bagian Generator Termoelektrik

3.2.1 Penentuan Ukuran Generator Termoelektrik

Ukuran generator termoelektrik awal yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Ukuran generator termoelektrik (Erturun & Mossi, 2012)

Variabel	Ukuran (mm)
Ukuran pin termoelektrik	1,4 x 1,4 x 3
Ukuran keramik	5,8 x 3,8 x 0,8
Ukuran lapisan tembaga dekat sisi panas	3,8 x 1,4 x 0,15
Ukuran lapisan tembaga dekat sisi dingin	2,4 x 1,4 x 0,15
Ukuran lapisan timah	1,4 x 1,4 x 0,1
Jarak antar pin	1

3.2.2 Penentuan Bahan Penyusun Elemen Generator Termoelektrik

Penentuan bahan penyusun elemen generator termoelektrik disesuaikan dengan temperatur pengoperasian generator termoelektrik. Pada penelitian ini, temperatur pengoperasian generator termoelektrik yang digunakan adalah 22°C hingga 160°C. Bahan penyusun elemen generator termoelektrik dapat dilihat pada Tabel 3.2. Bahan tersebut dipilih karena dapat bekerja secara optimal pada temperatur pengoperasian generator termoelektrik yang digunakan pada penelitian ini, sedangkan properti dari setiap bahan dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 3.2 Elemen penyusun generator termoelektrik dan bahan pembuatnya (Erturun & Mossi, 2012)

Bagian Penyusun	Bahan	Densitas (kg/m ³)	Poisson's Ratio
Lapisan Keramik	Al ₂ O ₃	3750	0,24
Pin Tipe-p	Bi ₂ Te ₃	7850	0,3
Pin Tipe-n	Bi ₂ Te ₃	7850	0,3
Lapisan Konduktor	Cu	8960	0,31
Lapisan Solder	Sn-Pb	9300	0,34

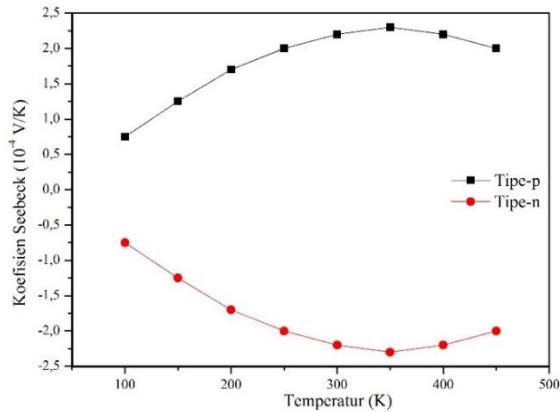
Tabel 3.3 Properti material Bi₂Te₃ dan Cu (Erturun & Mossi, 2012)

T (K)	Konduktivitas Termal (W/mK)		Resistivitas Elektris ($10^{-5} \Omega.m$)		Modulus Young (GPa)	
	Bi_2Te_3	Cu	Bi_2Te_3	Cu	Bi_2Te_3	Cu
100	2,5	482	0,54	$1,7 \times 10^{-3}$	66	
150	2	429	0,7	2×10^{-3}	65	
200	1,55	413	1	$2,5 \times 10^{-3}$	64,5	
250	1,35	406	1,39	$2,9 \times 10^{-3}$	63	93
300	1,28	401	1,67	$3,2 \times 10^{-3}$	62,5	95
350	1,35	396	1,82	$3,5 \times 10^{-3}$	62	98
400	1,75	393	1,43	$3,9 \times 10^{-3}$	61,5	96
450	2,6	389	1,05	$4,3 \times 10^{-3}$	61	88

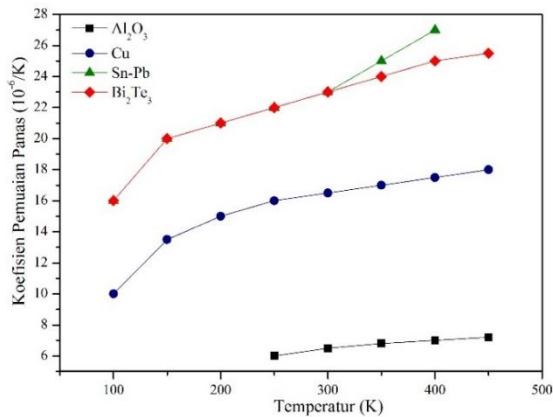
Tabel 3.4 Properti material Al_2O_3 dan Sn-Pb (Erturun & Mossi, 2012)

T (K)	Konduktivitas Termal (W/mK)		Resistivitas Elektris ($10^{-5} \Omega.m$)		Modulus Young (GPa)	
	Al_2O_3	Sn-Pb	Al_2O_3	Sn-Pb	Al_2O_3	Sn-Pb
250	42,72		10	9×10^{-23}	337	40
300	37,06	52	5	132×10^{-23}	335	32
350	32,26	51	1	17×10^{-23}	332	25
400	28,19	48	0,5	21×10^{-23}	330	17
450	24,74	35	0,1	25×10^{-23}	328	8

Nilai Koefisien Seebeck untuk pin termoelektrik tipe-p dan tipe-n dapat dilihat pada Gambar 3.2 sedangkan nilai koefisien pemuaian panas setiap material dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Koefisien seebeck pin termoelektrik (Erturun & Mossi, 2012)



Gambar 3.3 Koefisien pemuaian panas material (Erturun & Mossi, 2012)

3.3 Penentuan Variasi Geometri Generator Termoelektrik

Variasi geometri yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.5. Pemilihan variasi geometri pada penelitian ini berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa perubahan lapisan keramik, pengurangan jarak antar pin dan

pengurangan lapisan tembaga dapat mengurangi *thermal stress* pada generator termoelektrik (Wu et al., 2014). Perubahan bentuk pin yang diperoleh dengan adanya perubahan rasio luas pin dapat mengurangi *thermal stress* pada generator termoelektrik (Al-Merbaty et al., 2013).

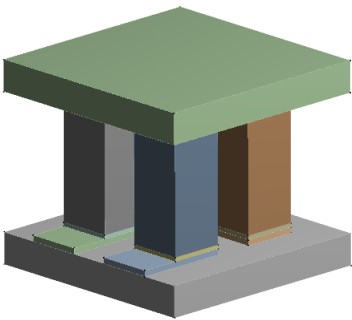
Tabel 3.5 Variasi geometri generator termoelektrik

Variabel	Variasi (mm)			
Rasio Luas Pin	0,5	1	1,5	2
Jarak antar Pin	0,25	0,5	0,75	1
Ketebalan Lapisan Keramik	0,3	0,8	1,3	1,8
Ketebalan Lapisan Tembaga	0,06	0,09	0,12	0,15

3.4 Simulasi Termodinamika Generator Termoelektrik

Simulasi termodinamika menggunakan *software thermal electric* yang terdiri dari tiga tahap yaitu *pre processing*, *solution* dan *post processing*. *Pre processing* terdiri dari beberapa tahap yaitu memasukkan properti bahan penyusun pada *engineering data*, pembuatan geometri, *meshing* dan penentuan kondisi batas yang digunakan seperti yang dijelaskan pada Sub bab 3.4.1 hingga 3.4.3.

3.4.1. Memasukkan Properti Bahan Penyusun, Pembuatan Geometri dan Penentuan Bahan Penyusun pada Geometri



Gambar 3.4 Geometri awal generator termoelektrik

Properti bahan penyusun setiap elemen generator termoelektrik dimasukkan ke dalam *engineering data software thermal electric*. Properti material yang dipengaruhi oleh temperatur dapat dimasukkan menggunakan fungsi tabular pada *engineering data*, selanjutnya adalah tahap pembuatan geometri menggunakan *design modeller software* tersebut. Pembuatan geometri dilakukan dengan urutan susunan berupa lapisan keramik, lapisan tembaga, lapisan timah, pin termoelektrik, lapisan timah, lapisan tembaga dan lapisan keramik. Geometri awal dibuat terlebih dahulu dengan ukuran seperti yang dijelaskan pada Sub bab 3.2.1.

Pembuatan geometri baru sesuai dengan variasi geometri yang diinginkan dapat dilakukan dengan sedikit mengubah geometri awal yang telah dibuat sebelumnya. Geometri awal dari generator termoelektrik yang akan disimulasikan dapat dilihat pada Gambar 3.4. Variasi selanjutnya memiliki bentuk pin yang sama dengan bentuk pin geometri awal karena yang divariasikan adalah jarak antar pin, ketebalan lapisan keramik atau lapisan tembaga sedangkan pada variasi rasio luas pin maka akan diaplikasikan rasio luas pin termoelektrik pada sisi panas dan dingin sesuai dengan Tabel 3.5. Detail ukuran luas pin pada setiap variasi rasio luas pin dapat dilihat pada Tabel 3.6. Tahap selanjutnya adalah pendefinisian bahan penyusun setiap elemen generator termoelektrik pada geometri yang telah dibuat.

Tabel 3.6 Detail ukuran luas pin pada variasi rasio luas pin

Rasio Luas Pin	Luas Pin (mm ²)	
	Pada Sisi Panas	Pada Sisi Dingin
0,5	1,3	2,6
1	1,96	1,96
1,5	2,352	1,568
2	2,6	1,3

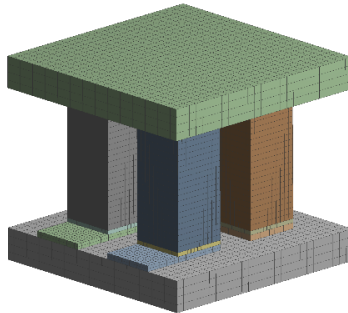
3.4.2. Meshing

Meshing merupakan proses pembagian geometri menjadi bagian – bagian kecil agar penyelesaian matematis yang

dilakukan sesuai dengan kondisi sesungguhnya. Pembuatan *mesh* pada simulasi termodinamika pada *software thermal electric* menggunakan *metode automatic* dengan ukuran *mesh medium*. Jumlah elemen pada proses *meshing* setiap variasi geometri pada simulasi termodinamika dapat dilihat pada Tabel 3.7 sedangkan tampilan hasil *meshing* geometri generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 3.5.

Tabel 3.7 Jumlah elemen *meshing* simulasi termodinamika

Variasi	Ukuran (mm)	Jumlah Elemen <i>Meshing</i>
Rasio Luas Pin	0,5	17648
	1	17095
	1,5	17160
	2	17067
Jarak antar Pin	0,25	17684
	0,5	17732
	0,75	17168
	1	17095
Ketebalan Lapisan Keramik	0,3	14624
	0,8	17095
	1,3	18948
	1,8	19254
	0,06	16752
Ketebalan Lapisan Tembaga	0,09	16752
	0,12	16677
	0,15	17095



Gambar 3.5 Hasil *meshing* pada simulasi termodinamika

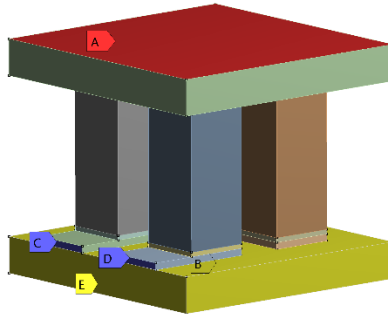
3.4.3. Penentuan Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan dan letaknya pada proses simulasi termodinamika generator termoelektrik secara berturut – turut dapat dilihat pada Tabel 3.8 dan Gambar 3.6.

Tabel 3.8 Kondisi batas simulasi termodinamika (Erturun & Mossi, 2012)

Kondisi Batas	Jumlah
<i>Hot Side Temperature</i>	160°C
<i>Cold Side Temperature</i>	22°C
<i>High Voltage</i>	87 mV
<i>Low Voltage</i>	0 mV
<i>Convection</i>	1e-6 W/m ² °C
<i>Ambient Temperature</i>	22°C

- A** hot side: 160, °C
- B** cold side: 22, °C
- C** high voltage: 87, mV
- D** low voltage: 0, mV
- E** Convection: 22, °C. $1.e-012 \text{ W/mm}^2\text{°C}$



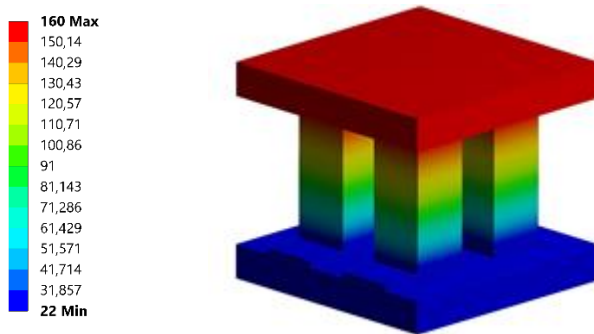
Gambar 3.6 Letak kondisi batas simulasi termodinamika

3.4.4. *Solution*

Tahap *solution* merupakan tahap perhitungan atau iterasi oleh komputer terhadap kondisi batas yang telah ditentukan. Pada tahap ini dipilih variabel yang ingin dianalisis yaitu berupa distribusi temperatur, arus yang digenerasikan dan panas yang diserap. Setelah pemilihan variabel yang ingin dianalisis, maka selanjutnya akan dilakukan proses iterasi hingga mencapai nilai konvergensi sehingga data hasil simulasi dapat diambil. Informasi konvergensi pada simulasi menggunakan *software thermal electric* dapat dilihat pada *solution information*.

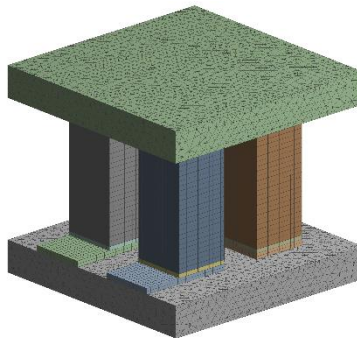
3.4.5. *Post Processing*

Tahap *post processing* merupakan tahap pengambilan hasil simulasi berupa kontur atau grafik, pada tahap ini penulis akan mengambil hasil simulasi berupa kontur distribusi temperatur, arus yang digenerasikan dan panas yang diserap oleh generator termoelektrik. Kontur distribusi temperatur yang diperoleh pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Kontur temperatur generator termoelektrik

3.5 Simulasi *Thermal Stress*



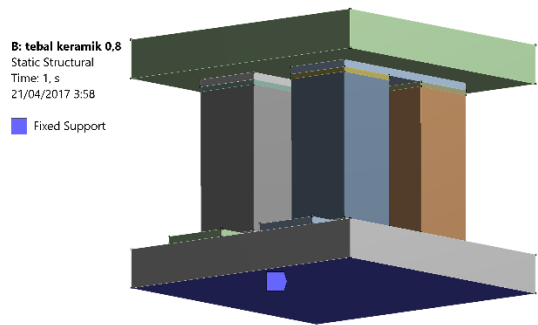
Gambar 3.8 Hasil *meshing* pada simulasi *thermal stress*

Simulasi *thermal stress* merupakan simulasi yang bertujuan untuk mengetahui distribusi *thermal stress* pada generator termoelektrik menggunakan *software static structural*. Pada simulasi ini, tidak perlu dilakukan input *engineering data* dan penggambaran geometri ulang karena dapat dilakukan *sharing engineering data* dan geometri dari *software thermal electric* ke *software static structural*. Pada tahap model di dalam simulasi ini, dilakukan penentuan ulang bahan penyusun elemen generator termoelektrik. Pembuatan *mesh* pada simulasi *thermal stress* menggunakan *metode automatic* dengan ukuran *mesh fine* kecuali untuk lapisan keramik menggunakan bentuk *mesh tetrahedron*.

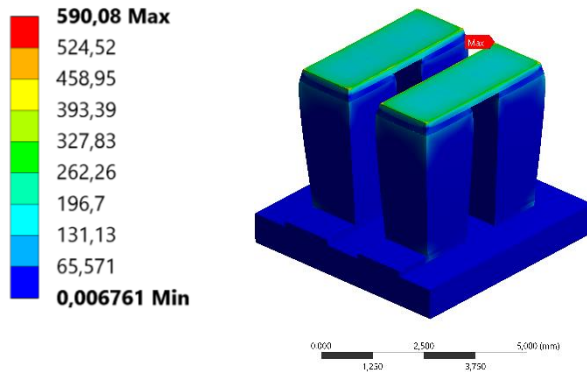
Hasil *meshing* geometri generator termoelektrik pada simulasi *thermal stress* dapat dilihat pada Gambar 3.8, sedangkan jumlah elemen pada proses *meshing* setiap variasi geometri pada simulasi *thermal stress* dapat dilihat pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Jumlah elemen *meshing* simulasi *thermal stress*

Variasi	Ukuran (mm)	Jumlah Elemen <i>Meshing</i>
Rasio Luas Pin	0,5	38382
	1	45164
	1,5	45143
	2	46120
Jarak antar Pin	0,25	44444
	0,5	44684
	0,75	44924
	1	45164
Ketebalan Lapisan Keramik	0,3	45316
	0,8	45164
	1,3	45088
	1,8	45012
Ketebalan Lapisan Tembaga	0,06	44629
	0,09	44629
	0,12	43568
	0,15	45164



Gambar 3.9 Letak kondisi batas simulasi *thermal stress*



Gambar 3.10 Kontur *thermal stress* generator termoelektrik

Kondisi batas yang digunakan pada tahap ini adalah *fixed support* dan beban berupa hasil distribusi temperatur yang diperoleh pada simulasi termodinamika generator termoelektrik. *Fixed support* merupakan tumpuan yang digunakan pada simulasi *thermal stress*. Pada simulasi ini, *fixed support* terletak pada sisi dingin generator termoelektrik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.9. Pada tahap *solution* dipilih variabel *stress equivalent* dan pada tahap *post processing* akan diperoleh hasil simulasi berupa kontur *thermal stress* pada geometri generator termoelektrik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.10.

3.6 Pengambilan Data Hasil Simulasi

Pada simulasi termodinamika, data hasil simulasi yang diambil berupa arus listrik yang digenerasikan, panas yang diserap pada sisi panas dan kontur distribusi temperatur sedangkan pada simulasi *thermal stress*, data hasil simulasi yang diambil berupa kontur distribusi *thermal stress* dan nilai *thermal stress* maksimum pada generator termoelektrik.

3.7 Verifikasi Hasil Simulasi

Verifikasi adalah proses penentuan bahwa hasil simulasi telah merepresentasikan suatu model secara akurat sesuai dengan teori

yang telah ada (Oberkampff & Trucano, 2002). Tujuan dari tahap verifikasi adalah memastikan bahwa hasil simulasi pada penelitian ini memiliki selisih maksimal 10% dengan hasil simulasi pada penelitian sebelumnya. Apabila data tidak sesuai dengan teori atau penelitian sebelumnya, maka akan dilakukan proses simulasi ulang. Data yang telah diperoleh dan lolos tahap verifikasi kemudian diolah dan dianalisis pada tahap selanjutnya. Untuk menghitung selisih hasil simulasi dapat dilakukan menggunakan Persamaan (3.1).

$$\text{selisih (\%)} = \frac{|\text{hasil simulasi} - \text{hasil penelitian}|}{\text{hasil penelitian}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

3.8 Analisis Data

Analisis data dilakukan setelah semua data hasil simulasi telah diperoleh. Pada bagian ini akan dianalisis mengenai distribusi temperatur, daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan pada setiap variasi geometri generator termoelektrik yang digunakan dengan mengacu pada teori maupun beberapa referensi dari jurnal penelitian sebelumnya.

3.9 Penarikan Kesimpulan

Penarikan kesimpulan dilakukan ketika seluruh analisis data dari setiap variasi telah dilakukan. Kesimpulan akan menjawab rumusan masalah dari penelitian dalam tugas akhir ini.

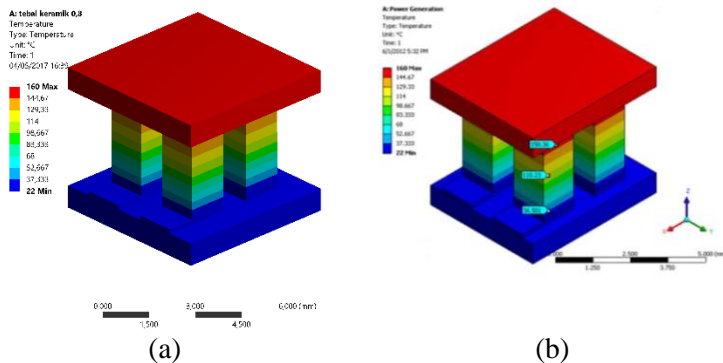
3.10 Penyusunan Laporan Akhir

Penyusunan laporan merupakan tahap terakhir dari pelaksanaan tugas akhir ini. Laporan memuat hasil penelitian yang telah dilaksanakan selama tugas akhir.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

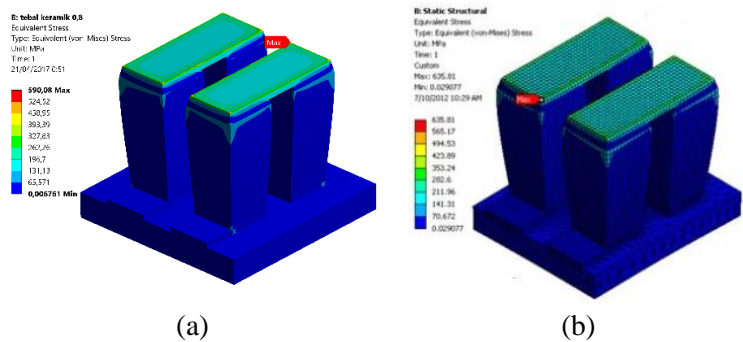
4.1 Verifikasi Hasil Simulasi

Pada penelitian ini, hasil simulasi dibandingkan dengan hasil simulasi pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ugur Erturun (2012). Oleh karena itu, pengaturan dalam simulasi ini dapat diterapkan pada setiap variasi berikutnya yang hasilnya dapat dipertanggung jawabkan.



Gambar 4.1 Kontur distribusi temperatur hasil simulasi pada (a) penelitian ini (b) penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012)

Perbandingan kontur distribusi temperatur dan *thermal stress* total hasil simulasi pada penelitian ini dengan kontur hasil simulasi pada penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012) dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Selain perbandingan kontur, pada tahap verifikasi ini dibandingkan pula nilai beberapa variabel hasil simulasi. Perbandingan hasil simulasi pada penelitian ini dengan nilai variabel hasil simulasi Ugur Erturun (2012) yang meliputi nilai arus yang digenerasikan, panas yang diserap, daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* generator termoelektrik dapat dilihat pada Tabel 4.1.



Gambar 4.2 Kontur thermal stress total hasil simulasi pada (a) penelitian ini (b) penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012)

Tabel 4.1 Perbandingan nilai variabel keluaran hasil simulasi pada penelitian ini dengan penelitian sebelumnya (Erturun & Mossi, 2012)

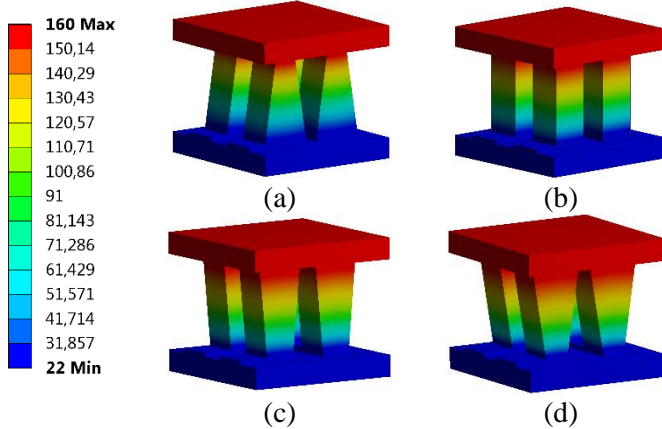
Variabel	Nilai Hasil Simulasi		
	Penelitian ini	Penelitian sebelumnya (Erturun, 2012)	Selisih (%)
Arus Listrik yang Digenerasikan (mA)	344,6	328	5,06
Panas yang Diserap (mW)	680,57	673	1,13
Daya Keluaran (mW)	29,98	28,5	5.19
Efisiensi	4,41	4,24	3,90
Thermal Stress Maksimum (MPa)	590,08	635	7,07

4.2 Analisis Termodinamika

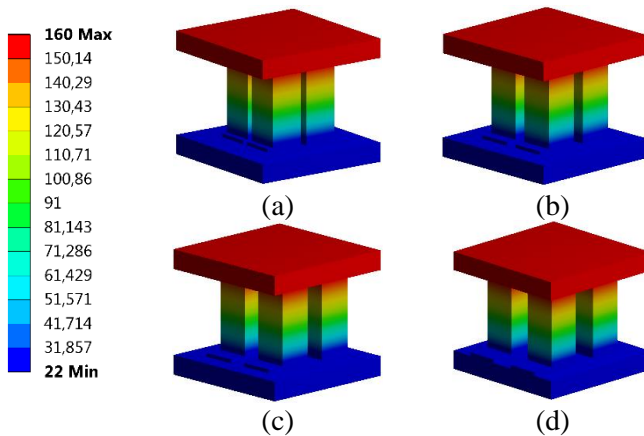
Analisis termodinamika pada penelitian ini adalah analisis terhadap distribusi temperatur generator termoelektrik pada setiap variasi geometri yang diberikan. Selain itu, pada simulasi termodinamika diperoleh data arus yang digenerasikan dan panas yang diserap oleh generator termoelektrik. Berdasarkan data tersebut dapat dihitung daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator termoelektrik.

4.2.1 Distribusi Temperatur Generator Termoelektrik Sepanjang Sumbu z

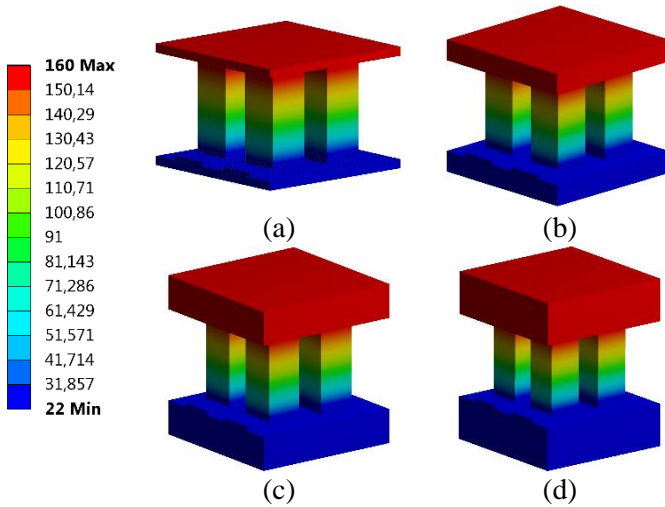
Distribusi temperatur generator termoelektrik sepanjang sumbu z dapat dilihat pada Gambar 4.3 hingga 4.6.



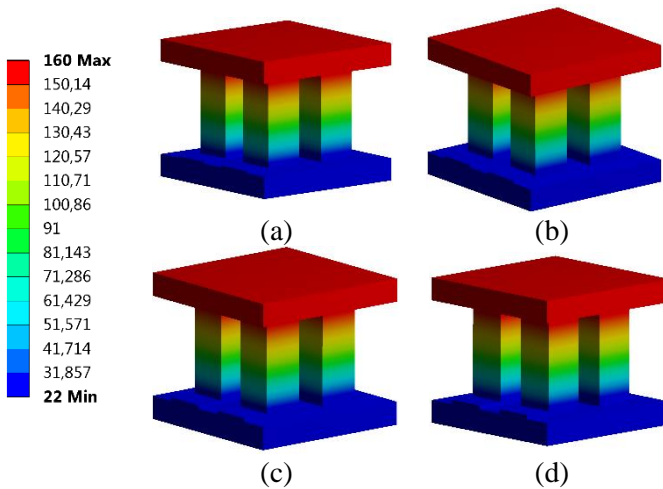
Gambar 4.3 Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2



Gambar 4.4 Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi jarak antar pin (a) 0,25 (b) 0,5 (c) 0,75 (d) 1 mm



Gambar 4.5 Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi ketebalan keramik (a) 0,3 (b) 0,8 (c) 1,3 (d) 1,8 mm



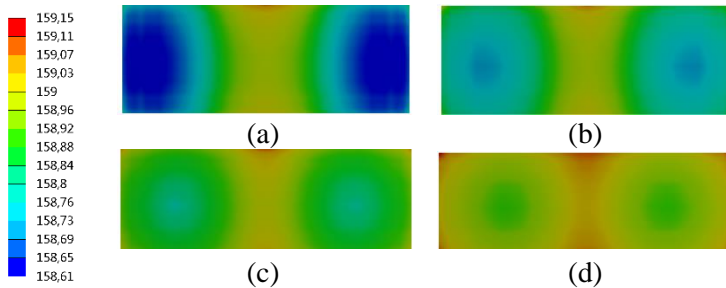
Gambar 4.6 Distribusi temperatur sepanjang sumbu z pada variasi ketebalan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm

Distribusi temperatur pada setiap variasi geometri dibandingkan ketika gradien temperatur yang diaplikasikan mencapai kondisi *steady* sehingga simulasi termodinamika yang dilakukan menggunakan *software steady-state thermal electric*. Gradien temperatur sebesar 138°C yang diaplikasikan mengakibatkan adanya perpindahan panas secara konduksi dari sisi panas menuju sisi dingin generator termoelektrik. Berdasarkan Gambar 4.3 hingga Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa temperatur generator termoelektrik menurun signifikan sepanjang sumbu z sesuai dengan arah perpindahan panas secara konduksi dari sisi panas menuju sisi dingin generator termoelektrik. Perubahan distribusi temperatur generator termoelektrik akibat pengaruh variasi geometri tidak dapat diamati secara signifikan dalam bentuk tiga dimensi sepanjang sumbu z . Hal tersebut dikarenakan temperatur sisi panas dan temperatur sisi dingin pada setiap variasi adalah sama yaitu 160°C dan 22°C .

Untuk dapat mengamati perubahan distribusi temperatur secara signifikan akibat adanya pengaruh variasi geometri maka diambil kontur distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y di bagian lapisan tembaga sisi panas generator termoelektrik yang akan dijelaskan pada Sub bab 4.2.2 hingga 4.2.5. Pengambilan distribusi temperatur pada daerah tembaga sisi panas juga dikarenakan distribusi temperatur pada daerah ini memberikan pengaruh signifikan terhadap *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik.

4.2.2 Pengaruh Rasio Luas Pin terhadap Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada permukaan lapisan tembaga dekat sisi panas untuk setiap variasi rasio luas pin generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.7.



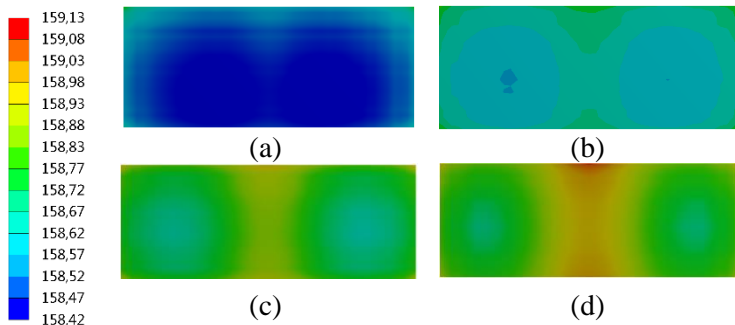
Gambar 4.7 Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2

Berdasarkan Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa jika rasio luas pin meningkat maka temperatur pada bagian lapisan tembaga dekat sisi panas yang berada tepat di atas pin semakin meningkat. Hal tersebut dikarenakan semakin besar rasio luas pin maka semakin luas pin termoelektrik pada sisi panas sehingga perpindahan panas yang terjadi pada bagian ini lebih besar sesuai dengan Hukum Fourier mengenai perpindahan panas secara konduksi dimana luas penampang berbanding lurus dengan panas yang dipindahkan secara konduksi. Semakin besar rasio luas pin maka gradien temperatur pada pin semakin meningkat hingga rasio 1,5 sedangkan pada rasio 2 gradien temperatur menurun. Gradien temperatur pada pin termoelektrik untuk setiap variasi rasio luas pin berturut – turut adalah 135,795 °C, 135,853 °C, 135,876 °C, 135,776 °C.

4.2.3 Pengaruh Jarak Antar Pin terhadap Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada permukaan lapisan tembaga dekat sisi panas untuk setiap variasi jarak pin generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.8. Dua bulatan pada distribusi temperatur tersebut dikarenakan adanya dua pin termoelektrik di bawah lapisan tembaga. Berdasarkan Gambar 4.8 dapat dilihat jika jarak antar pin meningkat maka temperatur pada bagian lapisan tembaga dekat

sisi panas yang berada tepat di atas pin semakin meningkat. Hal tersebut dikarenakan peningkatan jarak antar pin termoelektrik akan meningkatkan gradien temperatur generator termoelektrik (Wu et al., 2014) sehingga perpindahan panas secara konduksi semakin besar. Selain itu semakin besar jarak antar pin maka luas lapisan tembaga yang digunakan semakin besar sehingga perpindahan panas yang terjadi semakin besar sesuai Hukum Fourier mengenai perpindahan panas secara konduksi dimana luas berbanding lurus dengan panas yang dipindahkan secara konduksi.

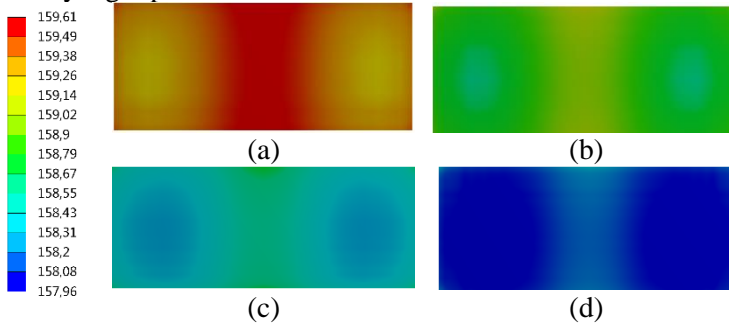


Gambar 4.8 Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi jarak antar pin (a) 0,25 (b) 0,5 (c) 0,75 (d) 1 mm

4.2.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan Keramik terhadap Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada permukaan lapisan tembaga dekat sisi panas untuk setiap variasi ketebalan lapisan keramik generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.9. Berdasarkan Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa semakin besar ketebalan lapisan keramik maka temperatur pada bagian lapisan tembaga dekat sisi panas yang berada tepat di atas pin semakin menurun. Hal tersebut dikarenakan semakin tebal lapisan keramik maka perpindahan panas yang terjadi lebih kecil sesuai dengan Hukum Fourier mengenai perpindahan panas

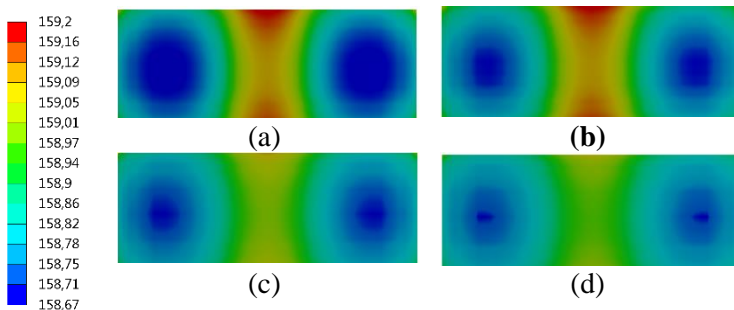
secara konduksi dimana ketebalan berbanding terbalik dengan panas yang dipindahkan secara konduksi.



Gambar 4.9 Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi ketebalan lapisan keramik (a) 0,3 (b) 0,8 (c) 1,3 (d) 1,8 mm

4.2.5 Pengaruh Ketebalan Lapisan Tembaga terhadap Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada permukaan lapisan tembaga dekat sisi panas untuk setiap variasi jarak pin generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Distribusi temperatur sepanjang sumbu x dan y pada variasi ketebalan lapisan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm

Berdasarkan Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa semakin besar ketebalan lapisan tembaga maka temperatur pada bagian lapisan tembaga dekat sisi panas yang berada tepat di atas pin semakin meningkat. Hal tersebut dikarenakan peningkatan ketebalan lapisan tembaga dapat menurunkan resistansi termal generator termoelektrik (Yamashita et al., 2004). Resistansi termal berbanding terbalik dengan perpindahan panas secara konduksi sehingga semakin kecil resistansi termal pada generator termoelektrik maka perpindahan panas yang terjadi semakin besar.

4.3 Pengaruh Geometri terhadap Performansi Generator Termoelektrik

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai performansi generator termoelektrik yang dipengaruhi oleh variasi geometri generator termoelektrik. Performansi tersebut ditinjau dari daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan. Hasil simulasi termodinamika yang diperoleh berupa data arus yang digenerasikan dan panas yang diserap. Berdasarkan hasil simulasi tersebut maka dapat dihitung daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan generator termoelektrik menggunakan Persamaan (2.15) dan (2.16).

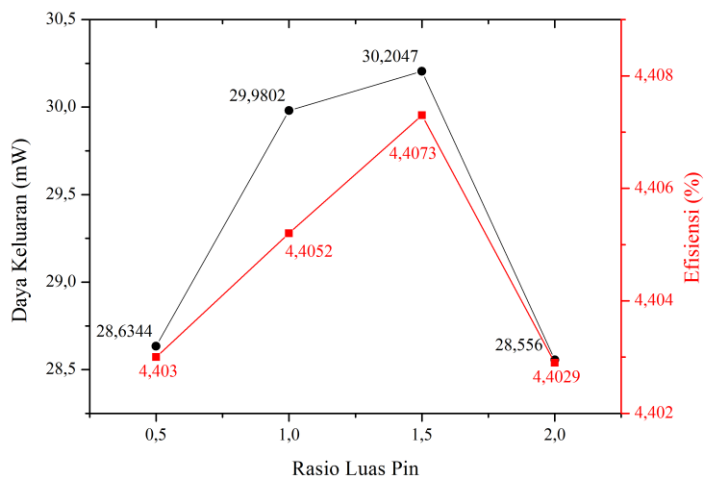
4.3.1 Pengaruh Rasio Luas Pin terhadap Performansi Generator Termoelektrik

Data hasil simulasi pengaruh rasio luas pin terhadap arus yang digenerasikan dan panas yang diserap oleh generator termoelektrik dapat dilihat pada Tabel 4.2. Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa panas yang diserap oleh sisi panas semakin meningkat dari rasio 0,5 hingga rasio 1,5 akan tetapi turun pada rasio 2 sehingga arus listrik yang dihasilkan semakin meningkat dari rasio 0,5 hingga rasio 1,5 dan turun pada rasio 2. Panas yang dilepas oleh sisi dingin generator termoelektrik untuk setiap rasio pin berturut – turut 621,68 mW, 650,59 mW, 655,13 mW dan 620,02 mW. Panas yang dilepas tersebut sebanding dengan panas yang diserap pada sisi panas.

Tabel 4.2 Hasil simulasi termodinamika dengan variasi rasio luas pin

Variasi	Ukuran (mm)	Arus yang Digenerasikan (mA)	Panas yang Diserap (mW)
Rasio Luas Pin	0,5	329,12	650,31
	1	344,60	680,57
	1,5	347,18	685,33
	2	328,23	648,57

Pengaruh rasio luas pin terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik pengaruh rasio pin terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik

Panas yang diserap sisi panas dan panas yang diserap sisi dingin dipengaruhi oleh gradien temperatur pada pin akibat adanya rasio luas pin seperti yang dijelaskan pada Sub bab 4.2.2 dimana gradien temperatur meningkat dari rasio 0,5 hingga rasio luas pin 1,5 dan menurun pada rasio 2. Sesuai dengan Hukum Fourier

mengenai perpindahan panas secara konduksi dimana gradien temperatur berbanding lurus dengan panas yang dipindahkan secara konduksi. Berdasarkan Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa adanya perubahan rasio luas pin dapat mempengaruhi daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan meningkat dari rasio 0,5 hingga 1,5 dan turun pada rasio 2. Hal tersebut sesuai dengan arus yang dihasilkan dan panas yang diserap oleh sisi panas generator termoelektrik.

4.3.2 Pengaruh Jarak Antar Pin terhadap Performansi Generator Termoelektrik

Data hasil simulasi pengaruh jarak antar pin terhadap arus yang digenerasikan dan panas yang diserap oleh generator termoelektrik dapat dilihat pada Tabel 4.3.

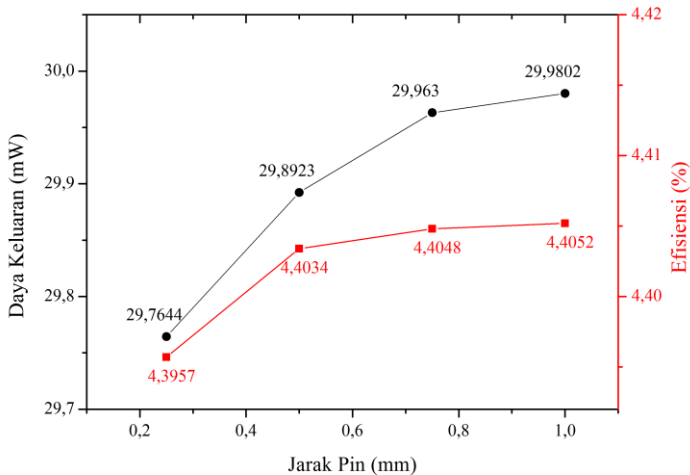
Tabel 4.3 Hasil simulasi termodinamika dengan variasi jarak antar pin

Variasi	Ukuran (mm)	Arus yang Digenerasikan (mA)	Panas yang Diserap (mW)
Jarak Antar Pin	0,25	342,12	677,13
	0,5	343,59	678,84
	0,75	344,40	680,23
	1	344,60	680,57

Berdasarkan Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa semakin besar jarak antar pin maka arus yang dihasilkan semakin tinggi. Arus yang dihasilkan sebanding dengan panas yang diserap oleh sisi panas generator termoelektrik. Peningkatan jarak antar pin akan meningkatkan gradien temperatur generator termoelektrik (Wu et al., 2014) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.8 sehingga semakin besar jarak antar pin maka panas yang diserap oleh pin dari sisi panas semakin besar. Selain itu, peningkatan jarak antar pin berbanding lurus dengan luas lapisan tembaga yang digunakan. Lapisan tembaga berfungsi untuk meminimalisir

resistansi elektris antara sumber panas dengan pin termoelektrik (Yamashita et al., 2004) sehingga semakin besar jarak antar pin maka lapisan tembaga yang digunakan semakin luas dan resistansi elektris semakin kecil. Oleh karena itu, arus yang digenerasikan oleh generator termoelektrik semakin besar sesuai dengan Hukum Ohm dimana arus listrik berbanding terbalik dengan resistansi elektris.

Pengaruh jarak antar pin terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik pengaruh jarak antar pin terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik

Berdasarkan Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa peningkatan jarak antar pin termoelektrik akan meningkatkan daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik. Hal tersebut dikarenakan peningkatan jarak antar pin dapat meningkatkan arus listrik yang digenerasikan oleh generator termoelektrik seperti pada Tabel 4.3. Daya keluaran dan efisiensi berbanding lurus dengan arus tersebut sehingga semakin tinggi arus yang digenerasikan maka daya keluaran dan efisiensi semakin tinggi.

4.3.3 Pengaruh Ketebalan Lapisan Keramik terhadap Performansi Generator Termoelektrik

Data hasil simulasi pengaruh ketebalan lapisan keramik terhadap arus yang digenerasikan dan panas yang diserap oleh generator termoelektrik dapat dilihat pada Tabel 4.4.

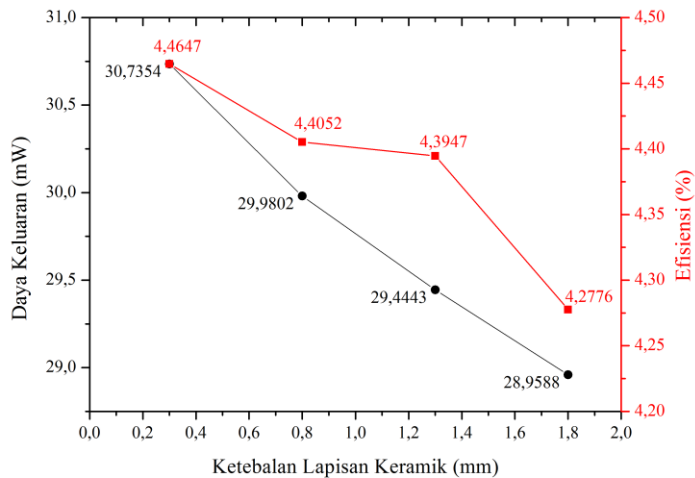
Tabel 4.4 Hasil simulasi termodinamika dengan variasi ketebalan lapisan keramik

Variasi	Ukuran (mm)	Arus yang Digenerasikan (mA)	Panas yang Diserap (mW)
Ketebalan Lapisan Keramik	0,3	353,28	688,41
	0,8	344,60	680,57
	1,3	338,44	674,99
	1,8	332,86	669,99

Berdasarkan Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa peningkatan ketebalan lapisan keramik menyebabkan penurunan arus listrik yang digenerasikan oleh generator termoelektrik. Hal tersebut disebabkan oleh adanya penurunan panas yang diserap pada sisi panas generator termoelektrik. Penurunan panas yang diserap tersebut akibat adanya penambahan ketebalan lapisan keramik. Sesuai dengan Hukum Fourier mengenai perpindahan panas secara konduksi yang dapat dituliskan secara matematis pada Persamaan 2.5. Berdasarkan Persamaan 2.5, ketebalan suatu material berbanding terbalik dengan panas yang dipindahkan secara konduksi. Oleh karena itu, semakin tebal lapisan keramik maka panas yang diserap oleh sisi panas secara konduksi dari sumber panas semakin kecil.

Pengaruh ketebalan lapisan keramik terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.13. Berdasarkan Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa semakin tebal lapisan keramik yang digunakan maka daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan semakin kecil. Hal tersebut dikarenakan penambahan lapisan keramik akan mengurangi arus yang digenerasikan oleh generator

termoelektrik seperti pada Tabel 4.4 sehingga daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan mengalami penurunan.



Gambar 4.13 Grafik pengaruh ketebalan lapisan keramik terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik

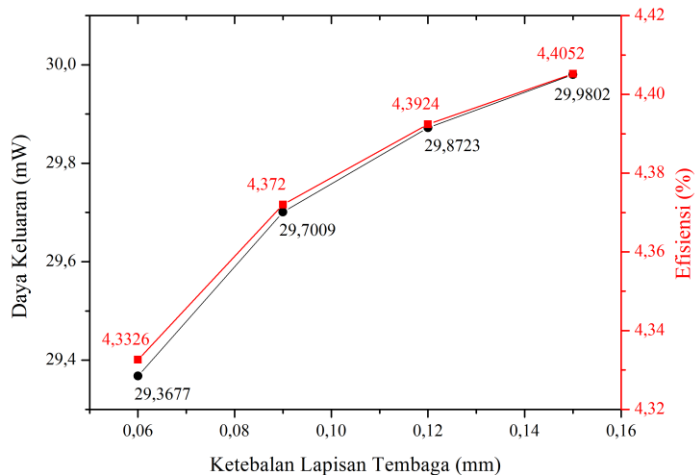
4.3.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan Tembaga terhadap Performansi Generator Termoelektrik

Data hasil simulasi pengaruh ketebalan lapisan tembaga terhadap arus yang digenerasikan dan panas yang diserap oleh generator termoelektrik dapat dilihat pada Tabel 4.5. Berdasarkan Tabel 4.5 dapat dilihat bahwa penambahan lapisan tembaga dapat meningkatkan arus listrik yang digenerasikan oleh generator termoelektrik. Hal tersebut disebabkan oleh adanya peningkatan panas yang diserap oleh sisi panas generator termoelektrik. Selain itu, lapisan tembaga berfungsi untuk meminimalisir resistansi elektris antara sumber panas dengan pin termoelektrik (Yamashita et al., 2004) sehingga semakin tebal lapisan tembaga yang digunakan maka semakin kecil resistansi elektris pada

generator termoelektrik. Sesuai dengan Hukum Ohm yang menerangkan bahwa resistansi listrik berbanding terbalik dengan arus yang dihasilkan sehingga semakin kecil resistansi listrik pada suatu rangkaian maka arus yang dihasilkan semakin besar.

Tabel 4.5 Hasil simulasi termodinamika dengan variasi ketebalan lapisan tembaga

Variasi	Ukuran (mm)	Arus yang Digenerasikan (mA)	Panas yang Diserap (mW)
Ketebalan Lapisan Tembaga	0,06	337,56	677,83
	0,09	341,39	679,34
	0,12	343,36	680,09
	0,15	344,60	680,57

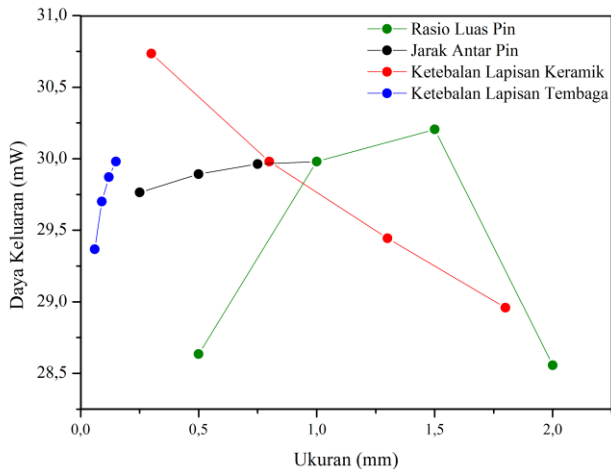


Gambar 4.14 Grafik pengaruh ketebalan lapisan tembaga terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik

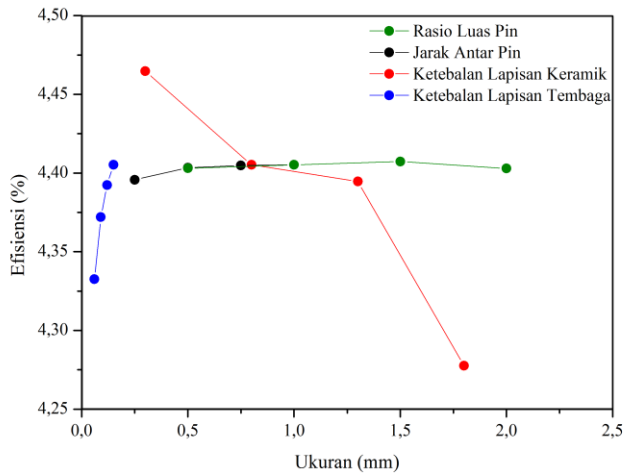
Pengaruh ketebalan lapisan tembaga terhadap daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.14. Berdasarkan Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa penambahan lapisan tembaga dapat meningkatkan daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Penambahan lapisan tembaga akan meningkatkan arus yang digenerasikan oleh generator termoelektrik sehingga dapat meningkatkan daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik karena arus berbanding lurus dengan daya keluaran.

4.3.5 Pengaruh Variasi Geometri secara Keseluruhan terhadap Performansi Generator Termoelektrik

Pengaruh setiap variasi geometri terhadap daya keluaran dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator termoelektrik berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.



Gambar 4.15 Grafik pengaruh variasi geometri terhadap daya keluaran generator termoelektrik

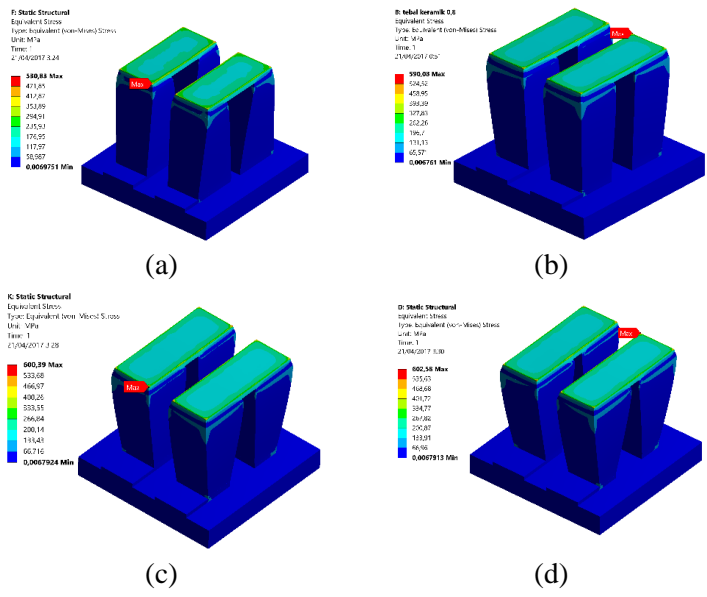


Gambar 4.16 Grafik pengaruh variasi geometri terhadap efisiensi generator termoelektrik

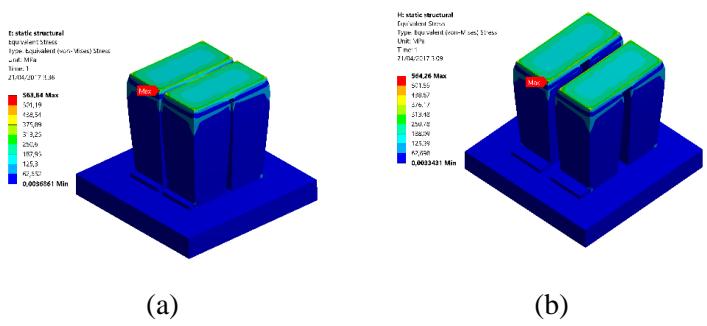
Berdasarkan Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa daya keluaran dan efisiensi maksimum generator termoelektrik sebesar 30,7354 mW dan 4,4647% yang dihasilkan pada variasi ketebalan lapisan keramik sebesar 0,3 mm. Dari Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 juga terlihat bahwa peningkatan daya keluaran dan efisiensi dapat diperoleh secara signifikan dengan meningkatkan ketebalan lapisan tembaga. Peningkatan daya keluaran dan efisiensi generator termoelektrik juga dapat dicapai dengan menambah jarak antar pin termoelektrik dan meningkatkan rasio luas pin dari 0,5 hingga 1,5 sedangkan penambahan lapisan keramik dapat mengurangi daya keluaran dan efisiensi pada generator termoelektrik.

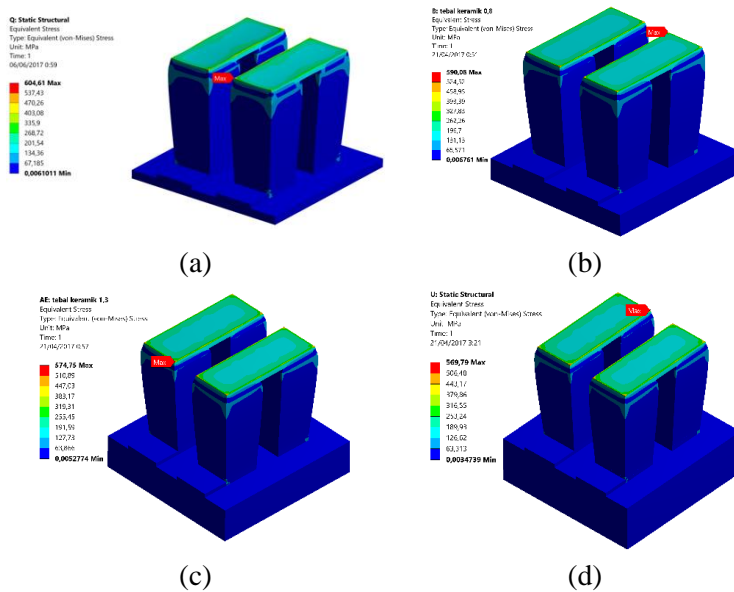
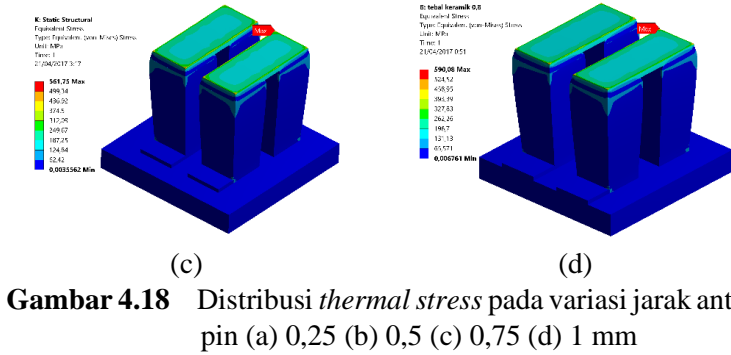
4.4 Distribusi *Thermal Stress* pada Generator Termoelektrik

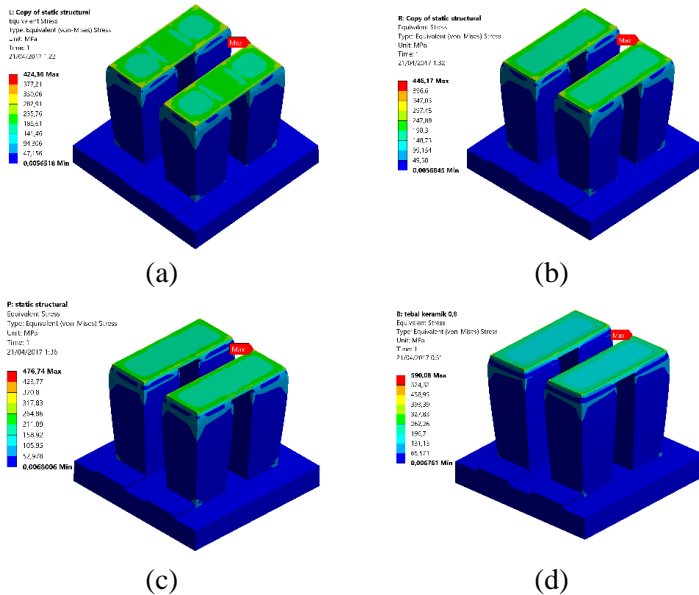
Distribusi *thermal stress* pada generator termoelektrik untuk setiap variasi geometri yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 4.17 hingga 4.20.



Gambar 4.17 Distribusi thermal stress dengan variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2





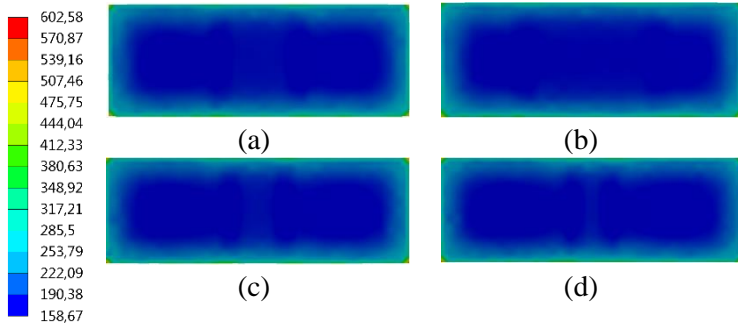


Gambar 4.20 Distribusi *thermal stress* pada variasi ketebalan lapisan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm

Berdasarkan Gambar 4.17 hingga 4.20 terlihat bahwa elemen penyusun generator termoelektrik pada sisi panas mengembang ketika diberi beban panas. Hal tersebut dikarenakan bahan penyusun elemen generator termoelektrik merupakan benda padat yang akan mengembang ketika dipanaskan dan menyusut ketika didinginkan (Callister & Wiley, 2007). Selain itu, *thermal stress* maksimum pada generator termoelektrik terletak pada titik sudut lapisan tembaga sisi panas. Hal tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan koefisien pemuaian panjang yang besar antara keramik pada sisi panas dan tembaga sesuai dengan Gambar 3.3. Pengaruh setiap variasi geometri terhadap *thermal stress* generator termoelektrik dijelaskan pada Sub bab 4.4.1 hingga 4.4.4.

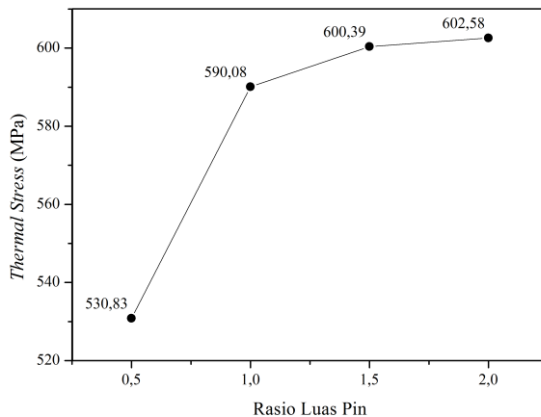
4.4.1 Pengaruh Rasio Luas Pin terhadap *Thermal Stress* Generator Termoelektrik

Distribusi *thermal stress* pada bagian lapisan tembaga sisi panas generator termoelektrik untuk setiap variasi rasio luas pin dapat dilihat secara detail pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Distribusi *thermal stress* dengan variasi rasio luas pin (a) 0,5 (b) 1 (c) 1,5 (d) 2 pada lapisan tembaga sisi panas

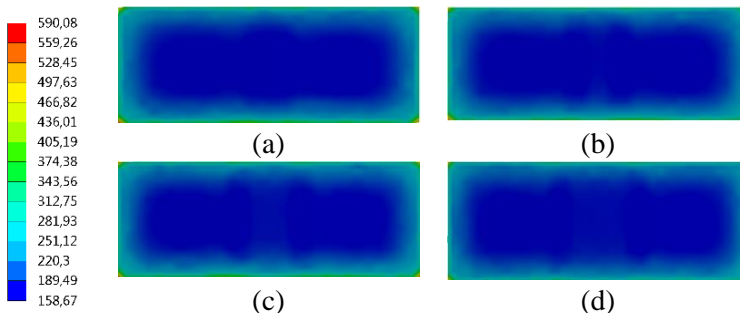
Berdasarkan Gambar 4.21 terlihat bahwa terdapat perbedaan distribusi *thermal stress* pada lapisan tembaga sisi panas untuk setiap variasi rasio luas pin yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan distribusi temperatur pada daerah ini seperti pada Gambar 4.7. Semakin tinggi temperatur pada suatu titik maka *thermal stress* pada titik tersebut semakin tinggi sesuai dengan Persamaan 2.19 dimana *thermal stress* berbanding lurus dengan perubahan temperatur. Berdasarkan Gambar 4.7 peningkatan rasio luas pin dapat meningkatkan distribusi temperatur pada generator termoelektrik sehingga *thermal stress* yang dihasilkan semakin tinggi sesuai dengan Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik pengaruh rasio luas pin terhadap *thermal stress* generator termoelektrik

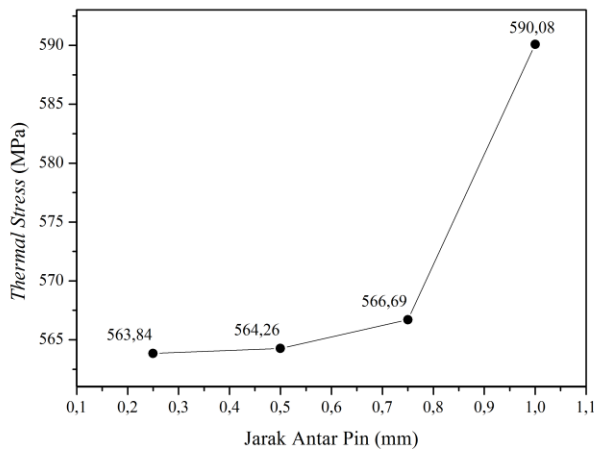
4.4.2 Pengaruh Jarak antar Pin terhadap *Thermal Stress* pada Generator Termoelektrik

Distribusi *thermal stress* pada bagian lapisan tembaga sisi panas generator termoelektrik untuk setiap variasi jarak antar pin dapat dilihat secara detail pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Distribusi *thermal stress* dengan variasi jarak antar pin (a) 0,25 (b) 0,5 (c) 0,75 (d) 1 mm pada lapisan tembaga sisi panas

Berdasarkan Gambar 4.23 terlihat bahwa terdapat perbedaan distribusi *thermal stress* pada lapisan tembaga sisi panas untuk setiap jarak antar pin yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan distribusi temperatur pada daerah ini seperti pada Gambar 4.8. Berdasarkan Gambar 4.8 peningkatan jarak antar pin dapat meningkatkan distribusi temperatur pada generator termoelektrik sehingga *thermal stress* yang dihasilkan semakin tinggi sesuai dengan Gambar 4.24.

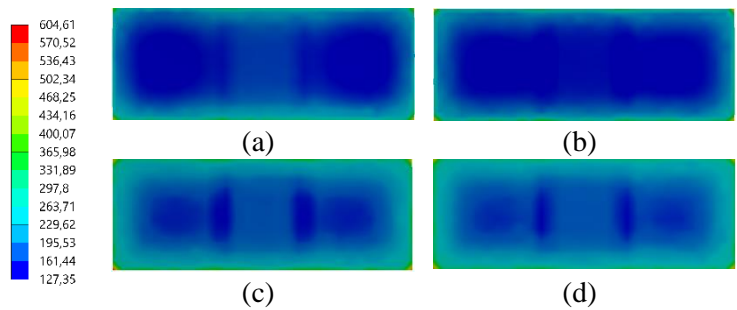


Gambar 4.24 Grafik pengaruh jarak antar pin terhadap *thermal stress* generator termoelektrik

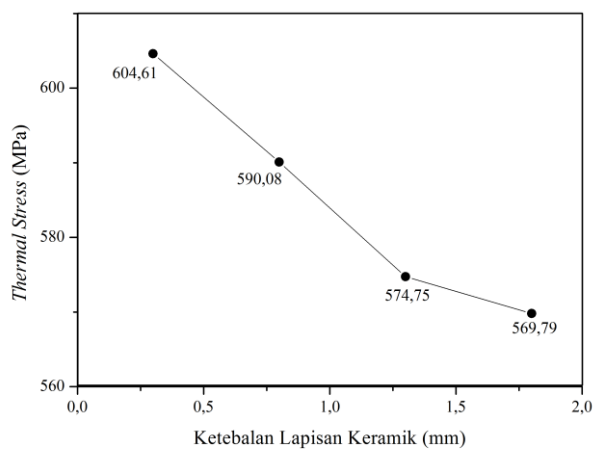
4.4.3 Pengaruh Ketebalan Lapisan Keramik terhadap *Thermal Stress* pada Generator Termoelektrik

Distribusi *thermal stress* pada bagian lapisan tembaga sisi panas generator termoelektrik untuk setiap variasi ketebalan keramik dapat dilihat secara detail pada Gambar 4.25. Berdasarkan Gambar 4.25 terlihat bahwa terdapat perbedaan distribusi *thermal stress* pada lapisan tembaga sisi panas untuk setiap variasi ketebalan lapisan keramik yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan distribusi temperatur

pada daerah ini seperti pada Gambar 4.9. Berdasarkan Gambar 4.9 peningkatan ketebalan keramik dapat menurunkan distribusi temperatur pada generator termoelektrik sehingga *thermal stress* yang dihasilkan semakin rendah sesuai dengan Gambar 4.26.



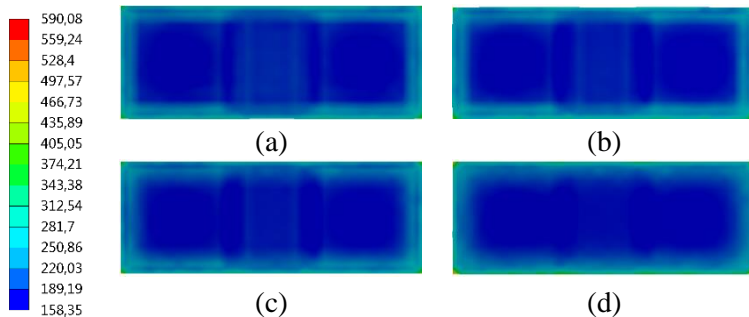
Gambar 4.25 Distribusi *thermal stress* dengan variasi ketebalan lapisan keramik (a) 0,3 (b) 0,8 (c) 1,3 (d) 1,8 mm pada lapisan tembaga sisi panas



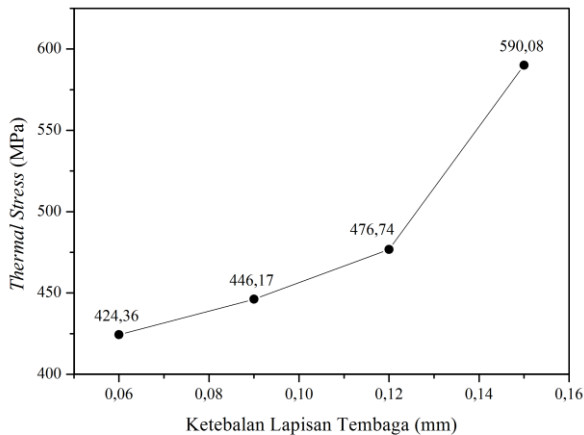
Gambar 4.26 Grafik pengaruh ketebalan lapisan keramik terhadap *thermal stress* generator termoelektrik

4.4.4 Pengaruh Ketebalan Lapisan Tembaga Terhadap *Thermal Stress* pada Generator Termoelektrik

Distribusi *thermal stress* pada bagian lapisan tembaga sisi panas generator termoelektrik untuk setiap variasi ketebalan lapisan tembaga dapat dilihat secara detail pada Gambar 4.27. Berdasarkan Gambar 4.27 terlihat bahwa terdapat perbedaan distribusi *thermal stress* pada lapisan tembaga sisi panas untuk setiap variasi lapisan tembaga yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan distribusi temperatur pada daerah ini seperti pada Gambar 4.10. Berdasarkan Gambar 4.10 peningkatan ketebalan lapisan tembaga dapat meningkatkan distribusi temperatur pada generator termoelektrik sehingga *thermal stress* yang dihasilkan semakin tinggi sesuai dengan Gambar 4.28.



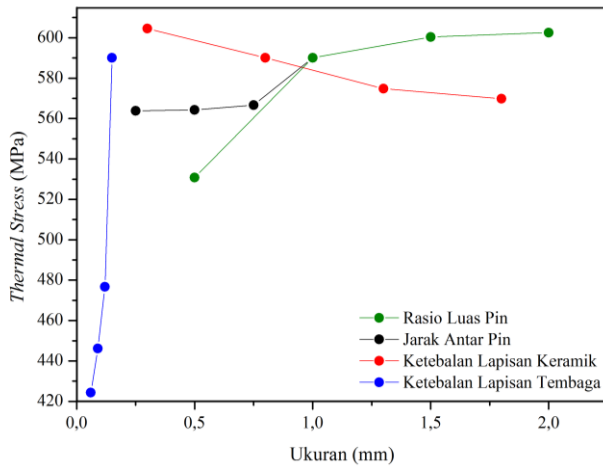
Gambar 4.27 Distribusi *thermal stress* dengan variasi ketebalan lapisan tembaga (a) 0,06 (b) 0,09 (c) 0,12 (d) 0,15 mm pada lapisan tembaga sisi panas



Gambar 4.28 Grafik pengaruh ketebalan lapisan tembaga terhadap *thermal stress* generator termoelektrik

4.4.5 Pengaruh Variasi Geometri terhadap Thermal Stress Generator Termoelektrik

Pengaruh setiap variasi geometri terhadap *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik dapat dilihat pada Gambar 4.29. Berdasarkan Gambar 4.29 dapat dilihat bahwa *thermal stress* maksimum generator termoelektrik terendah sebesar 424,36 MPa yang diperoleh pada variasi ketebalan lapisan tembaga 0,06 mm. Dari Gambar 4.29 juga terlihat bahwa peningkatan ketebalan lapisan tembaga dapat meningkatkan *thermal stress* generator termoelektrik secara signifikan. Peningkatan jarak antar pin dan penambahan rasio luas pin dapat meningkatkan *thermal stress* maksimum pada generator termoelektrik. Penambahan ketebalan lapisan keramik dapat mengurangi *thermal stress* maksimum generator termoelektrik.



Gambar 4.29 Grafik pengaruh variasi geometri terhadap *thermal stress* maksimum generator termoelektrik

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Daya keluaran dan efisiensi meningkat pada rasio luas pin dari 0,5 hingga 1,5 dan turun pada rasio 2. Daya keluaran dan efisiensi maksimum bernilai 30,2047 mW dan 4,4073% yang diperoleh pada variasi luas pin 1,5. Peningkatan rasio luas pin dapat meningkatkan *thermal stress* generator termoelektrik. *Thermal stress* terendah bernilai 530,83 MPa pada variasi rasio luas pin 0,5.
- b. Peningkatan jarak antar pin dapat meningkatkan daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Daya keluaran dan efisiensi maksimum bernilai 29,9802 mW dan 4,4052% yang diperoleh pada variasi jarak antar pin 1 mm sedangkan *thermal stress* terendah bernilai 563,84 MPa pada variasi jarak antar pin 0,25 mm.
- c. Peningkatan ketebalan lapisan keramik dapat mengurangi daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Daya keluaran dan efisiensi maksimum bernilai 30,7354 mW dan 4,4647% yang diperoleh pada variasi ketebalan lapisan keramik 0,3 mm sedangkan *thermal stress* terendah bernilai 569,79 MPa pada variasi ketebalan lapisan keramik 1,3 mm.
- d. Peningkatan ketebalan lapisan tembaga dapat meningkatkan daya keluaran, efisiensi dan *thermal stress* yang dihasilkan oleh generator termoelektrik. Daya keluaran dan efisiensi maksimum bernilai 29,9802 mW dan 4,4052% yang diperoleh pada variasi ketebalan lapisan tembaga 0,15 mm sedangkan *thermal stress* terendah bernilai 424,36 MPa pada variasi ketebalan lapisan tembaga 0,06 mm.

5.2 Saran

Saran yang diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- a. Untuk mengetahui perbedaan performansi generator termoelektrik yang signifikan pada analisis termodinamika dapat ditambahkan variasi bahan penyusun pin termoelektrik dan gradien temperatur yang diaplikasikan pada generator termoelektrik.
- b. Dapat ditambahkan analisis *lifetime* dari generator termoelektrik sebagai akibat adanya *thermal stress* pada generator termoelektrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Merbaty, A. S., Yilbas, B. S., & Sahin, A. Z. (2013). Thermodynamics and thermal stress analysis of thermoelectric power generator: Influence of pin geometry on device performance. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 683–692.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.07.021>
- Ali, H., & Yilbas, B. S. (2016). Influence of pin material configurations on thermoelectric generator performance. *Energy Conversion and Management*, 129, 157–167.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.031>
- Angrist, S. W. (1976). *Direct Energy Conversion*. Boston: Allyn and Bacon Inc.
- Callister, W. D., & Wiley, J. (2007). *Materials Science* (7th ed.). John Wiley & Sons. Inc.
- Cengel YA. (2006). *Heat and Mass Transfer A Practical Approach. A Principled Approach to Abuse of Dominance in European Competition Law*. New York: McGraw-Hill.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511676420.004>
- Erturun, U., Erermis, K., & Mossi, K. (2014). Effect of various leg geometries on thermo-mechanical and power generation performance of thermoelectric devices. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 126–139.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.07.027>
- Erturun, U., & Mossi, K. (2012). A Feasibility Investigation on Improving Structural Integrity of Thermoelectric Modules with Varying Geometry. In *Proceedings of the ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures, and Intelligent Systems* (pp. 1–7). Georgia: ASME.
- Erturun, U., & Mossi, K. (2015). Thermoelectric devices with rotated and coaxial leg configurations: Numerical analysis of performance. *Applied Thermal Engineering*, 85, 304–312.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.010>
- Hsu, C. T., Huang, G. Y., Chu, H. S., Yu, B., & Yao, D. J. (2011). An effective Seebeck coefficient obtained by experimental

- results of a thermoelectric generator module. *Applied Energy*, 88(12), 5173–5179.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.033>
- Karri, M. A. (2011). *Thermoelectric Power Generation System Optimization Studies*. New York.
- Oberkampf, W. L., & Trucano, T. G. (2002). Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(March 2002), 210–270.
[https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00005-2)
- Paul, D. (2014). Thermoelectric Energy Harvesting. In *ICT-Energy-Concepts Towards Zero-Power Information and Communication Technology*. Intech.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57092>
- sSharp, J. (2016). Thermoelectric Energy Conversion Devices. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, (April 2015), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.01093-6>
- Soo, S. L. (1968). *Direct Energy Conversion*. Prentice-Hall Inc.
- White, L. C. (1991). *Modern Power Station Practice - Volume G: Station Operation and Maintenance* (3rd ed.). Oxford: Pergamon Press.
- Wu, Y., Ming, T., Li, X., Pan, T., Peng, K., & Luo, X. (2014). Numerical simulations on the temperature gradient and thermal stress of a thermoelectric power generator. *Energy Conversion and Management*, 88, 915–927.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.069>
- Yamashita, O., Odahara, H., & Tomiyoshi, S. (2004). Effect of metal electrode on thermoelectric power in bismuth telluride compounds. *Journal of Materials Science*, 39(18), 5653–5658.
<https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000040072.92877.cd>
- Zhang, G., Jiao, K., Niu, Z., Diao, H., Du, Q., Tian, H., & Shu, G. (2016). Power and efficiency factors for comprehensive evaluation of thermoelectric generator materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 1034–1037.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.051>

Zheng, X. F., Yan, Y. Y., & Simpson, K. (2013). A Potential Candidate for Sustainable and Reliable Domestic Energy Generation-Thermoelectric Cogeneration System. *Applied Thermal Engineering* 53, 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.020>

“Halaman ini memang dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis lahir pada tanggal 12 Februari 1995 di Sidoarjo, Jawa Timur. Penulis menempuh pendidikan di SDN Bringin Bendo II (2001-2007), SMPN 1 Taman (2007-2010) dan SMAN 1 Taman (2010-2013). Penulis melanjutkan studinya di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis adalah rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai Badan Pengurus Harian bidang Kesejahteraan Mahasiswa di Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika periode 2014/2015 dan 2015/2016 selain itu penulis juga bergabung dalam Kelompok Studi Energi Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan Teknik Fisika ITS. Pengalaman *internship* penulis adalah melakukan *upgrade* PLC pada *Demin Water Treatment System* dari Allen Bradley ke Siemens S7 yang Terhubung dengan DCS Siemens T3000 di PT. YTL Jawa Timur. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail ayufitriyah12@gmail.com.